

CRISTHIAN JOSÉ FERREIRA TERRES

**AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇOS INOXIDÁVEIS
DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA**

**CURITIBA
2006**

CRISTHIAN JOSÉ FERREIRA TERRES

**AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇOS INOXIDÁVEIS
DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes

**CURITIBA
2006**

TERMO DE APROVAÇÃO

CRISTHIAN JOSÉ FERREIRA TERRES

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇOS INOXIDÁVEIS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia Mecânica, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Roseana da Exaltação Trevisan
UNICAMP/FEM

Prof^ª. Dr^ª. Ana Sofia Clímaco Monteiro D'Oliveira
UFPR/PG-Mec

Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortés Paredes
UFPR/PG-Mec
Presidente

Curitiba, 28 de julho de 2006

Nasceste no lar que precisavas,
vestiste o corpo físico que merecias,
moras onde melhor Deus te proporcionou,
de acordo com teu adiantamento.
Possuis os recursos financeiros coerentes
com as tuas necessidades, nem mais,
nem menos, mas o justo para as tuas lutas terrenas.
Teu ambiente de trabalho é o que elegeste
espontaneamente para a tua realização.
Teus parentes, amigos são as almas que atraíste
com tua própria afinidade.
Portanto, teu destino está constantemente sob teu controle.
Tu escolhes, recolhes, eleges, atraís,
buscas, expulsas, modificas tudo aquilo
que te rodeia a existência.
Teus pensamentos e vontade são a chave de teus atos e atitudes...
São as fontes de atração e repulsão na tua jornada vivência.
Não reclames nem te faças de vítima.
Antes de tudo, analisa e observa.
A mudança está em tuas mãos.
Reprograma tua meta,
busca o bem e viverás melhor.
Embora ninguém possa voltar atrás e
fazer um novo começo,
qualquer um pode começar agora e fazer um Novo Fim.
ESTAREI COM DEUS, PASSAREI PELA TUA CASA E
LEVAREI TODOS OS TEUS PROBLEMAS.

CHICO XAVIER.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná.

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PG-Mec) da Universidade Federal do Paraná.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica (Demec) da Universidade Federal do Paraná, seus professores que contribuíram para a minha formação como Engenheiro Mecânico.

Ao LacTec – Laboratório de Tecnologia para o Desenvolvimento pelo apoio ao projeto de pesquisa.

Ao meu orientador, Professor Ramón Sigifredo Cortés Paredes, Dr. Eng. pela orientação, paciência e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao colega e amigo, Engenheiro André Ricardo Capra, que me ensinou a operar a máquina de Aspersão Térmica.

Aos amigos e Técnicos em Petróleo Marcel e Joceli que muito me ajudaram no laboratório de Aspersão Térmica.

Ao Professor Sérgio Henke e à Professora Ana Sofia d'Oliveira que me ajudaram muito na parte de metalografia.

Ao colega e Engenheiro Rodrigo Bubniak Silvério, pela ajuda também na parte de materiais.

Ao colega e Engenheiro Danilo Lima, que me ensinou a trabalhar com o Inventor.

Aos Meus Pais, Elibio José e Maria da Graça pelo que fizeram por mim desde a minha concepção.

Ao Senhor Jesus Cristo, ao Pai Todo-Poderoso que, por intermédio do Divino Espírito Santo, me deram as capacidades intelectuais, físicas e espirituais para alcançar os meus objetivos, dentre eles o de apresentar a presente dissertação.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	x
Resumo	xiv
Abstract.....	xv
1. Introdução e Objetivos	1
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Cavitação.....	4
2.1.1 Introdução	4
2.1.2 Efeito da Cavitação	5
2.1.3 Tipos de Cavitação.....	9
2.1.4 Fatores Influentes aos Danos por Cavitação.....	10
2.1.4.1 Velocidade do fluido.....	10
2.1.4.2 Guia de ondas	11
2.1.4.3 Corrosão por cavitação.....	12
2.1.5 Velocidade de Erosão.....	13
2.1.6 Ensaio de Cavitação	14
2.1.6.1 Equipamentos para ensaio de cavitação por vibração	15
2.2 Materiais & Resistência à Cavitação	16
2.2.1 Relação com as Propriedades Mecânicas.....	20
2.2.2 Mecanismo Microestrutural de Resistência	22
2.2.2.1 Estrutura Cristalina	22
2.2.2.2 Transformação de Fase Induzida por Deformação	24
2.2.2.3 Transformação de Fase X Cavitação.....	25

2.2.2.4 Energia de Falhas De Empilhamento	27
2.3 Aspersão Térmica	28
2.3.1 Introdução	28
2.3.2 Processo de Aspersão Térmica à Arco Elétrico	30
2.3.3 Efeitos dos Parâmetros de Processo (ASP)	31
2.3.3.1 Gás de Arraste	31
2.3.3.2 Avanço do Arame e Corrente	33
2.3.3.3 Voltagem	34
2.3.3.4. Fonte de oxidação no processo de aspersão térmica por arco elétrico.	34
2.3.3.5 Distância de Aspersão	36
2.4 Aspersão Térmica & Cavitação	36
2.5 Aço Inoxidável Martensítico Macio CA-6NM	38
2.6 Planejamento de Experimentos	40
2.6.1 Técnicas de Taguchi.....	42
3 Metodologia Experimental.....	45
3.1 Processo de Aspersão Térmica.....	47
3.1.1 Materiais	47
3.1.1.1 Arames para Deposição.....	47
3.1.1.2 Substratos	47
3.1.1.3 Abrasivo para Jateamento	48
3.1.2 Equipamentos.....	48
3.1.2.1 Jateamento	48
3.1.2.2 Rugosidade	48
3.1.2.3 Deposição.....	50
3.1.2.4 Pré-Aquecimento	52
3.1.2.5 Medição de Espessura	53

3.2 Caracterização.....	54
3.2.1 Ensaio de Dobramento.....	54
3.2.2 Metalografia.....	56
3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS.....	56
3.3 Planejamento de Experimentos.....	57
3.4 Ensaio de Cavitação	58
3.5 Corpo de Prova Revestido por Cavitec®	59
4 Resultados e Discussão	61
4.1 Planejamento de Experimentos.....	61
4.2 Rugosidade dos Substratos	63
4.3 Aderência por Dobramento	65
4.4 Microestrutura e Medição de Porosidade e Teor de Óxidos	
66	
4.4.1 Microestrutura Depositada com Arame 309L T1	66
4.4.2 Resultado das Medições de Porosidade e Teor de Óxidos do	
Revestimento 309L T1	68
4.4.3 Microestrutura Depositada com Arame 410 NiMo	76
4.4.4 Resultado das Medições de Porosidade e Teor de Óxidos do	
Revestimento 410 NiMo	79
4.5 Ensaio de Cavitação	86
4.5.1 Revestimento de aço AISI 309L T1	86
4.5.2 Revestimento de aço AISI 410 NiMo.....	87
4.5.3 Comparação da Resistência à Cavitação das Ligas 309L T1,	
410 NiMo com a Liga Cavitec®	88

4.6 Avaliação da morfologia da região erodida no ensaio de cavitação.....	90
4.6.1 Revestimento de AISI 309L T1	90
4.6.2 Revestimento de AISI 410 NiMo.....	93
 5 Conclusões e Recomendações	97
 Bibliografia	99
 Anexos.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Diferentes comportamentos para as curvas de erosão acumulativa-tempo de exposição [1].....	14
Figura 2-2: Equipamento para ensaio por vibração.....	15
Figura 2-3: Perda de peso por unidade de tempo em função do tempo de ensaio – curva típica [1].....	19
Figura 2-4: Efeito da % de ferrita na taxa de erosão em aços inoxidáveis com relação a estrutura austenítica pura [8].....	23
Figura 2-5: Características da formação da camada depositada por aspersão térmica [15, 16].....	29
Figura 2-6: Esquema de funcionamento do processo por arco elétrico	30
Figura 2-7: Esquema proposto das fontes/zonas de oxidação no processo ASP [20].....	35
Figura 3-1: Rugosímetro.....	49
Figura 3-2: Sentidos de deslocamento do rugosímetro no corpo de prova	49
Figura 3-3: Medidas de rugosidade.....	50

Figura 3-4: Máquina de Aspersão à Arco Elétrico ValueArc 300 (esquerda) e pistola de deposição (direita).....	51
Figura 3-5: Câmara de pintura.....	52
Figura 3-6: Medidores de Temperatura	53
Figura 3-7: Medidor de espessura	53
Figura 3-8: Equipamento para ensaio de dobramento.....	54
Figura 3-9: Equipamento para ensaio vibratório de cavitação.....	59
Figura 4-1: Microestrutura do revestimento de aço inoxidável AISI 309L T1.....	67
Figura 4-2: Resultado da análise do software SADIE para a porosidade do revestimento de AISI 309L T1.....	70
Figura 4-3: Resultado da análise do software SADIE.....	73
Figura 4-4: Microestrutura do revestimento de aço inoxidável AISI 410.....	77
Figura 4-5: Resultado da análise do software SADIE.....	80
Figura 4-6: Resultado da análise do software SADIE.....	83
Figura 4-7: Resultado do ensaio erosivo de cavitação para o aço inoxidável 309L T1.....	87

Figura 4-8: Resultado do ensaio erosivo de cavitação para o aço inoxidável 410 NiMo..... 88

Figura 4-9: Resultado do ensaio erosivo de cavitação para as três ligas em estudo..... 89

Figura 4-10: Micrografia de uma região erodida no ensaio de cavitação acelerada..... 91

Figura A-1: Análise de anova para porosidade da amostra depositada com 309L T1 105

Figura A-2: Análise de anova para o teor de óxidos da amostra de 309L T1..... 105

Figura A-3: Análise de anova para a porosidade da amostra depositada com 410 NiMo..... 106

Figura A-4: Análise de anova para o teor de óxidos da amostra de 410 NiMo..... 106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1: Correlações de Thiruvengadam [7].....	20
Tabela 2-2: Características do processo de aspersão térmica à arco elétrico.....	31
Tabela 2-3: Parâmetros comuns do processo de aspersão térmica à arco elétrico.....	31
Tabela 2-4: Composição química do aço CA-6NM.....	39
Tabela 2-5: Propriedades mecânicas do aço CA-6NM (valores mínimos exigidos).....	39
Tabela 2-6: Arranjos ortogonais padrão [16].....	43
Tabela 2-7: Arranjo ortogonal O A₈(2⁷).....	44
Tabela 3-1: Arames usados no procedimento experimental (dados fornecidos pelos fabricantes).....	47
Tabela 3-2: Parâmetros utilizados nos ensaios de dobramento.....	55
Tabela 3-3 Critério de avaliação dos ensaios de dobramento para aprovação das camadas.....	55
Tabela 3-4: Parâmetros a serem estudados.....	57

Tabela 3-5: Parâmetros de deposição da liga Cavitec®.....	60
Tabela 4-1 – Níveis usados na deposição.....	61
Tabela 4-2 – Matriz de parâmetros de deposição AISI 309L T1.....	62
Tabela 4-3 – Matriz de parâmetros de deposição AISI 410 NiMo.....	63
Tabela 4-4: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 309L T1.....	64
Tabela 4-5: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 410 NiMo.....	64
Tabela 4-6: Resultados do ensaio de aderência AISI 309L T1.	66
Tabela 4-7: Porosidade dos revestimentos de 309 L T1.....	68
Tabela 4-8: Óxidos dos revestimentos de 309 L T1.....	69
Tabela 4-9: Resumo de ANOVA para o efeito sobre a porosidade na deposição de 309L T1.....	71
Tabela 4-10: Níveis de parâmetros que minimizam a porosidade na deposição do aço inox AISI 309 L T1.....	73

Tabela 4-11: Resumo de ANOVA para o efeito sobre o teor de óxidos na deposição a deposição de 309L T1..... 74

Tabela 4-12: Níveis de parâmetros que minimizam o teor de óxidos na deposição do aço inox AISI 309 L T1..... 75

Tabela 4-13: Porosidade dos revestimentos de 410 NiMo.. 79

Tabela 4-14: Óxidos dos revestimentos de 410 NiMo..... 79

Tabela 4-15: Resumo de ANOVA para o efeito sobre a porosidade na deposição de 410 NiMo. 81

Tabela 4-16: Níveis de parâmetros que minimizam a porosidade na deposição do aço inox AISI 410 NiMo..... 82

Tabela 4-17: Resumo de ANOVA para o efeito sobre o teor de óxidos na deposição de 410 NiMo..... 83

Tabela 4-18: Níveis de parâmetros que minimizam o teor de óxidos na deposição do aço inox AISI 410 NiMo..... 85

Tabela 4-19: Taxas de erosão no ensaio de cavitação..... 89

Tabela 4-20: Dados dos principais constituintes obtidos pelo EDSa..... 92

Tabela 4-21: Dados dos principais constituintes obtidos pelo EDSb..... 92

Tabela 4-22: Dados dos principais constituintes medidos onde foi registrados os EDSa..... 95

Tabela 4-23: Dados dos principais constituintes medidos onde foi registrados os EDSb..... 95

Tabela A-1: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 309L T1..... 103

Tabela A-2: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 410 NiMo..... 104

RESUMO

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS DE AÇOS INOXIDÁVEIS DEPOSITADOS POR ASPERSÃO TÉRMICA

A erosão por cavitação é um fenômeno comum em turbinas hidráulicas, degradando-a e gerando um grande problema à manutenção das usinas hidroelétricas. Normalmente a recuperação desses danos em usinas é efetuada por processos convencionais de soldagem. Algumas turbinas necessitam de muitos cuidados no momento da soldagem (um exemplo são as turbinas de CA-6NM), encarecendo, e muito, todo o processo. Propõe-se neste trabalho a utilização de outra técnica de reparo, a aspersion térmica, para esses tipos de turbinas. Utilizou-se o processo de aspersion térmica por arco elétrico, depositando aços inoxidáveis AISI 309L T1 e AISI 410 NiMo. A escolha dos níveis de cada parâmetro foi efetuada com o auxílio de planejamentos de experimentos e técnicas de Taguchi. Os corpos de prova foram analisados e ensaiados, com equipamento vibratório, avaliando-se sua resistência frente à cavitação. Os revestimentos confeccionados apresentaram baixos níveis de porosidade e oxidação além de resistência à cavitação equivalente à liga Cavitec depositada pelo mesmo processo.

ABSTRACT

EVALUATION OF STAINLESS STEEL COVERINGS DEPOSITED BY THERMAL SPRAY

The erosion for cavitation is a common phenomenon in hydraulic turbines, degrading it and generating a great problem to the maintenance of the plants. Normally the recovery of these damages is effected by conventional processes of welding. Some turbines need many cares at the moment of the welding (an example is the CA-6NM turbines). Suggests in this work the use of another process, the thermal spray, for these kinds of turbines. The arc spray process was used, depositing stainless steel AISI 309L T1 and AISI 410NiMo. The choice of the levels of each parameter was effected with the aid of techniques of Taguchi. The coating had been analyzed and testing, with vibratory equipment, evaluating its resistance to the cavitation. The confectioned coverings presented small levels of porosity and oxidation beyond resistance to the cavitation equivalent to the Cavitec deposited for arc spray process.

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A cavitação é um problema que afeta diretamente todos os tipos de máquinas hidráulicas que realizam o transporte de algum tipo de fluído: Bombas, turbinas, injetores sofrem com os danos causados pela cavitação, desde o desgaste erosivo até a perda de rendimento.

A cavitação é um fenômeno complexo que surge devido às condições de fluxo que induzem a formação de regiões onde se tenham baixas pressões, atingindo a pressão de vapor da água. Formam-se bolhas ou cavidades com vapor de água em seu interior. Essas cavidades seguem com o fluxo do fluído. Quando elas atingem regiões com maiores pressões, implodem, formando micro jatos e ondas de pressão. Quando essa implosão ocorre suficientemente próxima às superfícies sólidas do equipamento, causará o desgaste da superfície. Esse fenômeno é chamado de erosão por cavitação (EC).

Nas usinas hidrelétricas, as turbinas geradoras são seriamente afetadas pela cavitação, principalmente pela erosão causada em suas pás, cubo e coroa. Esses danos comprometem a disponibilidade das unidades geradoras e, conseqüentemente, o potencial de faturamento da empresa.

As turbinas são normalmente fundidas em aço carbono. Nas regiões onde se tem maior possibilidade de ocorrência de cavitação, costuma-se fazer um revestimento soldado de aços inoxidáveis austeníticos AISI 309L ou ligas a base de cobalto. Apesar da maior resistência à cavitação apresentada pelos depósitos austeníticos, turbinas com alto índice de cavitação sofrem altas taxas de erosão, de até 6 mm/ano, levando à necessidade de recuperações das regiões erodidas a cada 2 anos [1].

Na Usina Bento Munhoz da Rocha (US-GBM), no Estado do Paraná, suas turbinas recebem depósitos médios de 1000 kg de eletrodos para a recuperação das regiões erodidas a cada dois anos. A proprietária da usina, a Companhia Paranaense de Energia (COPEL) calcula que, a cada reparo, são gastos US\$ 200.000,00 em mão-de-obra e materiais, isso desconsiderando as perdas causadas pela indisposição do gerador [1].

Além disso, há outros fatores que devem ser considerados como prejudiciais a cada recuperação: tensões residuais causadas pelo aporte térmico durante a soldagem e defeitos (porosidades e inclusões) que acabam nucleando trincas e, consigo reduzir a vida útil das turbinas.

No ano 2000, foi colocado em funcionamento a Usina Salto Caxias (PR), na qual os rotores foram fabricados em aço inoxidável martensítico macio (CA6MN), que segundo a literatura especializada [2, 3] tem excelente resistência à cavitação. No entanto, após aproximadamente 30.000 horas de operação, apareceram sinais de cavitação nas saídas das pás e na coroa. Sabe-se que aços inoxidáveis martensíticos macios são de difícil soldabilidade, o que pode ser contornado com um rigoroso controle do ciclo térmico durante a deposição do aço inox AISI 410, para, com isso, evitar a ocorrência de trincas durante o reparo. Contudo, não é possível fazer um eficiente tratamento de alívio de tensões, podendo, as tensões residuais, gerarem trincas e acelerar o processo de cavitação.

Diante do exposto, revela-se a importância da pesquisa em materiais e processos resistentes à cavitação. Muitos estudos apresentam o comportamento de novas ligas (chamadas superligas), como as à base de cobalto ou outras que utilizam menores níveis de cobalto e, conseqüentemente, têm seu preço bastante reduzido, todas depositadas por soldagem.

Essas ligas apresentam um mecanismo de resistência à cavitação baseado no endurecimento superficial, associado às transformações de fase $\gamma \Rightarrow \alpha'$ e/ou $\gamma \Rightarrow \epsilon$ causadas por deformações oriundas do colapso das bolhas e dos micro-jatos.

A maioria das técnicas de reparo abordada na literatura se refere à soldagem por eletrodo revestido ou MIG/MAG [1, 2, 3, 4], todos apresentando o inconveniente da geração de tensões residuais, muito retrabalho nas áreas afetadas (esmerilhamento, polimento, etc.) associado aos altos tempos de parada para sua deposição.

Para contornar essas dificuldades propõe-se explorar a utilização da aspersão térmica por arco elétrico para depositar revestimentos a base de aços inoxidáveis AISI 309L e AISI 410. Conhece-se que, quando é utilizada a aspersão térmica, não são introduzidas tensões residuais no substrato revestido [5], devido a não haver a fusão do metal revestido, espera-se, com isto aumentar a vida útil dos rotores, pela não introduzir tensões residuais na região reparada.

Os principais objetivos desejados para este projeto são:

- Estudar a viabilidade de usar a aspersão térmica à arco elétrico para revestir aços ao carbono com aços inoxidáveis AISI 309L e AISI 410 NiMo.
- Estudar o comportamento frente à cavitação das ligas AISI 309L e AISI 410 NiMo depositadas por aspersão térmica.
- Contribuir para o desenvolvimento da tecnologia de revestimentos resistentes à cavitação depositados por aspersão térmica.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cavitação

2.1.1 Introdução

A cavitação constitui um fenômeno complexo, freqüentemente encontrado em circuitos e máquinas hidráulicas operando com líquidos. Pela sua enorme importância prática, ela tem sido objeto de inúmeros estudos de natureza teórica, numérica e, principalmente, experimental. Apesar disso, a dinâmica deste fenômeno e os mecanismos que lhe dão origem são, ainda hoje, pouco conhecidos em muitos de seus aspectos.

A cavitação pode causar danos tanto estruturais quanto energéticos. Olhando pelo lado hidrodinâmico, um efeito que pode ser é o incremento na resistência total do escoamento. Ocorre também a diminuição da força que o líquido aplica à superfície. Estes dois fatores fazem o rendimento de turbinas e bombas hidráulicas se reduzir; em bombas há uma maior necessidade de aumento de potência para deslocar o líquido, enquanto que em turbinas há uma diminuição da energia gerada.

Outro efeito da cavitação é a causa de danos em equipamentos hidráulicos. Pode-se considerar este como um efeito de grande importância para a engenharia, com a manutenção e eventual troca de equipamentos ou peças destes, às vezes muito deteriorados. A cavitação age erodindo a superfície do canal de escoamento e, eventualmente com a retirada de material protetor da superfície contra ataques por corrosão.

Alguns efeitos associados à cavitação são ruídos e vibrações. Os primeiros não apresentam grandes problemas, uma vez que estes equipamentos por si mesmos já produzem ruído em demasia. Casos específicos como em submarinos militares o fato ruído pode, no entanto, estar associado a ser descoberto por

sonares. Já em casos de vibrações, um problema associado seria com relação a fadiga do material, o que pode levar a uma falha prematura do equipamento.

Do ponto de vista fenomenológico, a cavitação pode ser explicada da seguinte maneira. Quando o escoamento de um líquido atinge uma região de baixa pressão, pode ocorrer a vaporização do fluido, com a conseqüente formação de bolhas. Estas bolhas, arrastadas pelo escoamento até regiões de pressão mais elevada superior à pressão de vaporização do fluido na temperatura de trabalho, se condensam de maneira extremamente rápida e violenta, comprometendo a operação e a vida útil de máquinas, equipamentos e instalações hidráulicas ou navais. As baixas pressões necessárias para a vaporização do fluido e as altas pressões causadoras do colapso das bolhas encontram-se, muitas vezes, associadas à formação de vórtices e ao descolamento da camada limite.

2.1.2 Efeito da Cavitação

A palavra cavitação deriva do latim *cavus* – cavidade – e significa a formação de bolhas de vapor em um fluido. O processo de formação das bolhas de vapor pode ser originado de dois modos diferentes, por aquecimento do fluido, mantendo-se sua pressão constante ou por diminuição de sua pressão, mantendo-se a temperatura constante. No primeiro caso, ocorre apenas a transição da fase líquida para a fase vapor, mas quando a mudança de fase ocorre pela queda da pressão então o fenômeno é denominado de cavitação.

Como os efeitos da cavitação, ou até mesmo sua ocorrência, dependem de uma série de variáveis físicas, uma previsão de sua ocorrência em larga intensidade nem sempre é possível. Do outro lado, mesmo os efeitos de uma cavitação em moderada intensidade se faz sentir negativamente, do ponto de vista de engenharia, causando sérios distúrbios no funcionamento de uma série de equipamentos hidromecânicos como medidores de vazão, bombas, turbinas

hidráulicas, válvulas de controle, etc. causando, muitas vezes, até mesmo colapso de funcionamento e elevados prejuízo. O estudo do fenômeno bem como sua identificação representa um alto grau de complexidade, ainda não completamente estabelecido, por vários fatores, tais como a não existência de uma metodologia garantida para a avaliação do fenômeno; as dificuldades de acesso físico a muitos equipamentos em operação, que dificulta a observação do fenômeno e finalmente; o grande número de variáveis físicas que influenciam diretamente e de forma dinâmica o fenômeno.

Os elevados níveis de ruídos produzidos caracteristicamente pela cavitação em uma ampla escala de frequências e as acentuadas vibrações decorrentes, produzem rupturas das tubulações e junções devidas, principalmente, a fadiga dos materiais. As vibrações produzidas podem implicar em grandes amplitudes de oscilação e, em alguns casos, partes das instalações se soltam de suas bases e fixações, produzindo efeitos danosos, praticamente impedindo sua operação. A contabilização dos prejuízos não deve ficar apenas na soma da mão de obra e dos materiais de reposição despendidos, mas também se deve acrescentar as perdas decorrentes de manter uma máquina, ou instalação completa fora de atividade, cessando sua produção.

A erosão das paredes sólidas da tubulação observada pelo fenômeno da cavitação em bombas, válvulas, turbinas hidráulicas, canais, dutos, comportas, representa uma séria restrição à operação destes elementos. Por exemplo, a retirada progressiva de material das pás de uma turbina hidráulica, provoca, além de uma perda significativa de rendimento da máquina hidráulica, o desbalanceamento do rotor. Uma operação, com rotor desbalanceado pode provocar danos irreversíveis nos mancais e paradas de manutenção freqüentes. A parada para substituição, ou para recuperação, de um rotor cavitado, pode mostrar-se dispendiosa, quer pelo custo da operação, quer pelos valores deixados de serem produzidos, provocado pela parada não programada.

A Cavitação provocada por vórtices tipo ferradura na saída de comportas, vertedouros, canais de dissipação, etc. provocam manutenção freqüentes nas centrais de geração de energia elétrica. Neste aspecto, a erosão cavitacional sobre superfícies de concreto em plantas hidroelétricas é um assunto que demanda uma parte considerável da atenção dos projetistas deste tipo de instalação.

A presença de uma fase gasosa no escoamento líquido implica em uma restrição ao escoamento, causando uma sensível diminuição da vazão, considerável perda de carga e pulsações de pressão indesejáveis no escoamento. Uma parte significativa da energia gasta pelas bombas é irreversivelmente perdida, aumentando sobremaneira os custos de bombeamento e dificultando o controle de vazão.

A presença de uma fase gasosa também interfere diretamente no funcionamento de alguns tipos de medidores de vazão como placas de orifício, medidores de turbinas, fio quente industrial e venturis. Também, a formação e o desprendimento das bolhas de vapor, alteram as propriedades médias do fluido dificultando o perfeito funcionamento da instrumentação. Alguns tipos de instrumentação para medida de vazão implicam na presença de uma sonda composta de um obstáculo rígido imerso no escoamento, como os medidores de vazão a efeito vórtice (vortex meter) e os anemômetros de filme quente com sondas protegidas para aplicações industriais. Quando a velocidade do fluido for alta o suficiente, cavitação pode ocorrer na presença da sonda e os resultados obtidos da medição podem não apresentar consistência física.

Por causa da geometria de muitos tipos de válvulas de controle de vazão, em que o colapso da bolha de vapor ocorre muito próximo às paredes, as válvulas operadas sobre este tipo de condição estão sujeitas a uma severa erosão de suas superfícies internas. Infelizmente esta é uma situação bastante freqüente e danosa para a operação das válvulas.

Testes efetuados com uma grande variedade de diferentes fluidos, incluso metais líquidos - sódio em alta temperatura e mercúrio metálico -, líquidos criogênicos-hidrogênio e oxigênio líquidos-, mostraram que a presença de efeitos cavitantes também podem ser observados. A cavitação também ocorre em fluidos escoando no interior de tubulações, como nos sistemas hidráulicos de aviões. A formação de bolhas no interior do circuito hidráulico oferece uma séria restrição ao escoamento causando avarias em partes do sistema, ruído audível, vibrações, perdas de eficiência e uma operação errática do motor hidráulico. Para uma redução destes efeitos sugere-se o emprego de tanques e válvulas de alívio, a redução das velocidades do fluido e o aumento das pressões no sistema, aumento das pressões de sucção nas bombas, diminuição de mudanças bruscas nas seções das tubulações e controle da temperatura e pressão de vapor do fluido do sistema.

Entretanto, apesar de numerosas descrições dos efeitos danosos da cavitação serem encontrados na literatura, em alguns poucos casos, a cavitação pode ter efeitos benéficos e ser aproveitada. Este é o caso descrito por ARNDT (1981) em que a cavitação é utilizada no processo de homogeneização do leite e para a limpeza de superfícies sólidas.

Também a EPA (U.S. Environmental Protection Agency) descreve (EPA report EPA/540/AR-93/520) um sistema desenvolvido pela Magnum Water Technology para tratamento de águas utilizando-se radiação ultravioleta, peróxido de hidrogênio como oxidante e um sistema para produção de cavitação. Durante o processo de cavitação a água é decomposta em extremamente reativos átomos de hidrogênio e radicais OH. A água contaminada de impurezas orgânicas é bombeada através de uma câmara de cavitação e a luz ultravioleta é produzida por lâmpadas de vapor de mercúrio. O sistema mostra-se extremamente eficiente. Máquinas para a produção de cavitação por meio de ultra-som são disponíveis comercialmente, inclusive de pequeno porte para aplicação doméstica.

2.1.3 Tipos de Cavitação

Existem quatro tipos de cavitação:

- cavitação movente;
- cavitação fixa;
- cavitação em turbilhão;
- cavitação por vibração.

Estes tipos de cavitação podem ser agrupados ainda em dois grupos, chamados transientes e quase-estáveis.

A cavitação movente é um tipo composta por cavidades transientes individuais – bolhas – que se movem com o líquido, se expandem, contraem e entram em colapso. Estas formas de cavitação aparecem em pontos de baixa pressão, aparentando serem bolhas estáveis. Porém, tais bolhas são extremamente instáveis devido à sua movimentação. Para ilustrar, considerando um corpo em rotação, aparece uma região limitada e aparentemente estável (enquanto durar o movimento). No entanto, em uma visão detalhada, percebe-se que tal região é formada por pequenas bolhas que se formam no início da região e entram em colapso no fim dela. Vários experimentos foram feitos sobre este tipo de cavitação por ser este o que mais danifica as superfícies.

A cavitação fixa é uma forma que aparece em condições específicas, em que a bolha formada toma a forma de toda a região de baixa pressão. Seria como uma união de todas as bolhas da versão anterior em uma só. Este tipo de cavitação é considerado estável, pois não se move e permanece onde está enquanto o fluxo continuar.

Geralmente a cavitação fixa é acompanhada de uma região posterior muito turbulenta, com aparência “espumante”, à cavidade, porém pode aparecer totalmente límpida. Em torno de seus limites há a formação de muitas cavitações

moventes, que crescem muito rapidamente, mas entrando em colapso após a passagem do fim da região de cavitação. Em condições extremas, a cavidade ocuparia toda a superfície do objeto, sendo que ao fim desta a bolha deixaria de ser estável, formando a supercavitação.

A cavitação em turbilhão é encontrada no centro de turbilhões, podendo ser confundido com cavitação movente ou fixa. Como aparece principalmente em ponta de propulsores de navios, tal cavitação é também chamada de cavitação de ponta. Costuma deixar rastros no fluxo em forma de hélice, com a característica de ser uma cavitação que não envolve grandes pressões. Como o seu colapso ocorre sempre fora da região onde está a superfície, sua formação não está associada a danos nos equipamentos em que ela é originada.

A cavitação por vibração é diferente das demais pela forma que se origina. Com a vibração de superfícies, ocorre a formação de regiões de alta e baixa pressão repetidas vezes, conforme a frequência do oscilador. Isto forma cavidades que crescem e entram em colapso logo em seguida, provocando danos na superfície que vibra. Tal conceito de cavitação é utilizado em ensaios de cavitação em materiais, sendo este um método prático e rápido.

2.1.4 Fatores Influentes aos Danos por Cavitação

2.1.4.1 Velocidade do fluido

A velocidade do fluido influencia diretamente a quantidade de danos causados por cavitação. Estudos mostraram que a quantidade de “pites” por unidade de área aumenta com a velocidade do fluido, variando logaritmicamente. Considera-se que a taxa de pites seria proporcional à diferença entre a velocidade do fluido (V) e a velocidade de da região onde não há danos (V_0). O fator multiplicativo varia de caso em caso.

Em experimentos em túneis Venturi foram encontrados valores que variavam de 5 a valores negativos. Em experimentos com disco rotativo, o valor variava em torno de 7, mas decaía com o aumento dos danos.

Outros pesquisadores consideram que a taxa máxima de perda de material geralmente varia como uma função exponencial da velocidade relativa entre a superfície e o fluido [6]. Em erosão por cavitação, o expoente mais comum é seis, no entanto valores tão altos quanto dez ou tão baixos quanto dois também já foram observados.

2.1.4.2 Guia de ondas

O efeito guia de ondas é outro fator influente na danificação de superfícies. Ocorre em materiais dúcteis, com a concentração de danos em certos pontos, acelerando o processo de danificação.

Com um primeiro colapso de uma bolha em C_1 causa a deformação com retirada de V_1 quantidade de material. Uma nova bolha entra em colapso ao dobro da distância da primeira bolha e gera suas ondas de pressão. No entanto, como a distancia é o dobro, considerando que o dano causado cai a um valor $1/R^2$ (sendo R a distancia até a superfície), não sendo o suficiente para causar danos na superfície.

No entanto, devido à depressão surgida anteriormente, ocorre que o raio da onda de pressão é diminuído à medida que entra na cavidade, sendo que ao chegar ao fundo esta com a mesma pressão que a bolha em C_1 iria causou, mas com uma área de ação menor. Com isso, ocorre um aumento da profundidade da depressão sem o aumento da área. Contudo, a intensidade da cavitação permanece constante, mas sua eficácia é incrementada.

2.1.4.3 Corrosão por cavitação

Na avaliação dos danos causados em equipamentos erodidos, nem todos os danos foram causados por cavitação. A corrosão ocorre quando da retirada do material protetor da superfície pela cavitação, sendo esta uma simples camada de metal passivado ou um material com aço inoxidável. No primeiro caso, se a superfície não conseguir se recompor rapidamente, o material estará exposto a mais corrosão, que pode penetrar profundamente nesta. A formação de pilha galvânica ajuda ainda mais no processo, pois se a região anódica é a região erodida, ocorre uma maior rapidez e profundidade na erosão.

Como a cavitação causa ainda uma série de esforços repetitivos na superfície, pode ocorrer a formação de corrosão por tensão, tendo efeitos tão desastrosos quanto anteriormente.

Os efeitos da cavitação na corrosão vão muito além de iniciar o processo tão simplesmente. Como as bolhas são preenchidas por gases – principalmente vapor – pode conter oxigênio, um fator que aceleraria o processo de corrosão.

A corrosão é facilmente confundida com a cavitação, pois sua aparência é muito semelhante, com pequenos pites distribuídos na superfície. Tais pites podem contribuir para o incremento dos danos causados pela cavitação, pois em suas crateras pode ocorrer o efeito guia de ondas – descrito anteriormente.

O fato que os danos causados por cavitação e corrosão estão associados, de forma que se deve levar em conta os dois fatores ao se definir as causas dos danos na superfície, mesmo que seja difícil, devido as suas semelhanças, de quantificar cada um dos processos.

2.1.5 Velocidade de Erosão

A figura 2-1 mostra os modelos mais comuns de erosão cumulativa com o tempo de exposição. Para a curva “bem-comportada” não se observa perda de material até terminado o período de incubação. Ocorre então um crescimento rápido da velocidade de erosão até um máximo, que persiste por algum tempo. Por fim, usualmente decresce a um valor mais baixo, que pode tanto permanecer relativamente estável quanto variar de uma forma totalmente imprevisível. A extensão do período de incubação, máxima velocidade de erosão e a forma das porções subseqüentes da curva de velocidade de erosão dependem da intensidade de cavitação ou impacto líquido, das propriedades do material, e (em menores proporções) das condições originais da superfície. Em baixas intensidades hidrodinâmicas, a atividade química do material e do meio também podem influenciar a velocidade de erosão. O período de incubação parece coincidir com o tempo necessário para desenvolver uma subsuperfície encruada (subsurface work-hardened layer). Durante esse tempo somente pittings randômicos ocorrem. Assim que perdas de material são detectadas, as características da superfície mudam, com fratura, pittings profundos e marcas de fadiga. Reduções na velocidade de falha parecem ocorrer quando a superfície torna-se suficientemente rugosa, de forma que impactos individuais são amortecidos por regiões deformadas preenchidas por líquido.

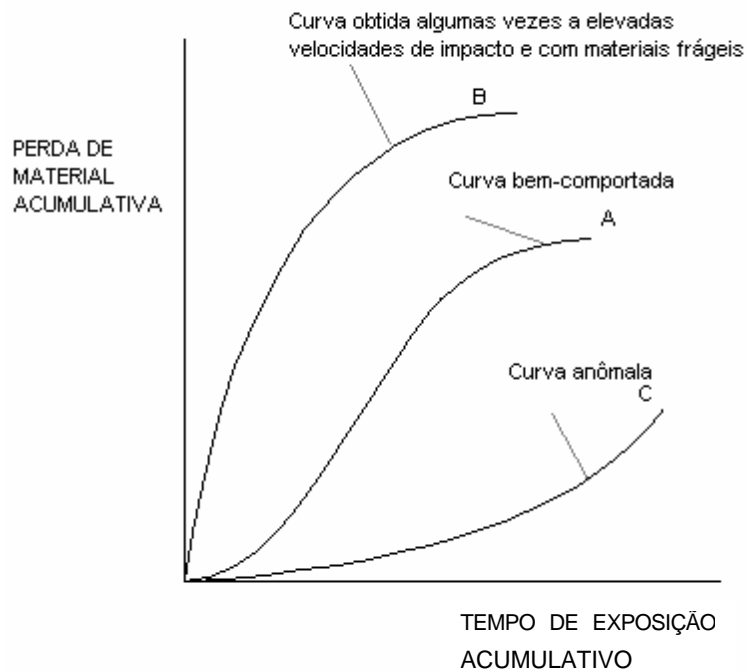


Figura 2-1: Diferentes comportamentos para as curvas de erosão acumulativa-tempo de exposição [1].

2.1.6 Ensaio de Cavitação

Existem vários tipos de equipamentos para ensaiar cavitação – desde equipamentos de alta velocidade até de pequeno porte ou portáteis. Alguns podem ser mais voltados ao estudo da forma de danificação dos materiais por cavitação, como o Venturi. Equipamentos de pequeno porte são os preferidos pelos pesquisadores, sendo o por vibrações o mais comum.

Podemos agrupar os equipamentos em três tipos de modelo de cavitação:

- por vibração,
- por impacto e
- por fluxo.

Será apresentado apenas o modelo de ensaio de cavitação por vibração, devido a ser o utilizado neste trabalho.

2.1.6.1 Equipamentos para ensaio de cavitação por vibração

A cavitação é provocada essencialmente por um fluido estático. Também denominados testes por ultra-som, usualmente é composto de um movimento recíproco de um sensor submerso a uma frequência relativamente alta, provocando cavitação pela oscilação de pressão estática do líquido.

O equipamento (figura 2-2) consiste em uma haste montada verticalmente e com um indutor de vibração como uma espiral com frequência de ressonância ou um cristal piezelétrico, que faz a haste vibrar. Na ponta inferior, um corpo de prova fica imerso em líquido e é afetado diretamente pela cavitação provocada pela oscilação, erodindo rapidamente o material.

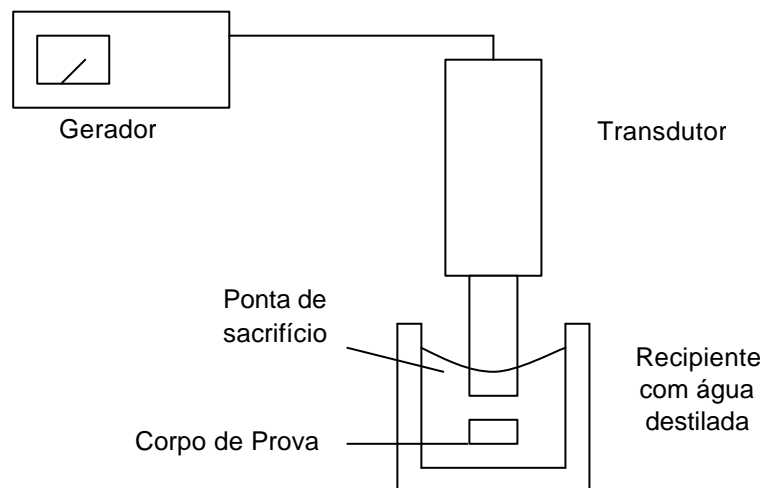


Figura 2-2: Equipamento para ensaio por vibração.

Esses equipamentos são bastante utilizados para se estudar o fenômeno de falha por cavitação, devido a serem os mais econômicos e que necessitam dos menores períodos de teste. A principal desvantagem consiste do fato de que, pela sua natureza, parâmetros de um sistema real, como velocidade e pressão não

podem ser utilizadas para projetar resultados, uma vez que usam cavitação por vibração como fonte de danos no material – o que não ocorre em casos reais em máquinas hidráulicas.

2.2 Materiais & Resistência à Cavitação

Apesar de todo o desenvolvimento tecnológico empregado no projeto e construção de turbomáquina hidráulicas, verifica-se que existem grandes limitações na eliminação da ocorrência do fenômeno de cavitação através da mudança no projeto ou nas características operacionais dos equipamentos.

Quando se modifica o perfil das pás de uma turbina de hidrelétrica, visando a redução ou eliminação da cavitação se esbarra em um outro problema ainda mais grave que o primeiro: redução de eficiência e potência das máquinas. Quando se olha pelo lado da eficiência e potência, verifica-se que é interessante a existência de certo nível de cavitação que possa ser controlado pela manutenção da turbina com reparos ou a utilização de materiais que apresentem uma garantia de elevada resistência aos danos causados pela cavitação.

Dentre os materiais que apresentam característica de resistência à cavitação, destaca-se a utilização dos aços inoxidáveis Ni-Cr, que são empregados há anos na forma de camadas protetoras, depositadas por soldagem, em turbinas de aço carbono. A performance do inox Ni-Cr está relacionada às suas propriedades mecânicas e a sua resistência à corrosão, já que a corrosão age como acelerador da erosão provocada pela cavitação.

O avanço na performance das turbinas resulta em condições de alta intensidade de cavitação, resultando na necessidade de desenvolvimento de ligas com alta resistência a cavitação, chamados de *revestimentos duros* (“*handfacing*”), como os aços inoxidáveis austeníticos, de baixo carbono,

microligados ao cobalto. Essas ligas esbarram em um sério problema: o custo. Devido a isso, muito se tem estudado para desenvolver ligas com as mesmas propriedades de resistência à cavitação, mas, com menores custos.

Um fato que dificulta o desenvolvimento de materiais que resistam à cavitação é a impossibilidade de relacionar a característica de resistência à cavitação às demais propriedades dos materiais, havendo apenas uma relação limitada a alguns poucos materiais semelhantes.

A resistência dos materiais frente à cavitação varia conforme as condições e tipos de material envolvido. Com materiais metálicos devemos nos preocupar ainda com a corrosão, oriunda da retirada da proteção da superfície, que sofre ainda o impacto repetido do colapso das bolhas, o que leva a formação de fadiga.

A retirada de material da superfície pode se caracterizar por um maior efeito das ondas de pressão ou dos microjatos, o que leva a deformação de materiais dúcteis (com seus efeitos sobre a cavitação) ou com a retirada de “lascas” – pequenos pedaços de metal – em superfícies de metal frágil. De qualquer forma, a deformação empreendida no material leva fadiga deste, o que pode vir a provocar uma falha mais grave.

Os materiais têm sua resistência afetada por diversos fatores, desde sua composição até características metalúrgicas. Materiais com dureza alta podem apresentar boas características de resistência, principalmente se estiver associada com um aumento da tenacidade do material. Algumas ligas de materiais não ferrosos foram desenvolvidos especialmente para este fim, sendo superiores aos aços inoxidáveis como proteção, apesar de terem um custo maior.

As altas pressões e frequência desenvolvidas no processo de cavitação fazem, seja através dos micro-jatos ou de ondas de pressão, quando ocorre próxima a superfície sólida, com que os materiais não resistam à cavitação. Ocorrendo, então, a erosão da superfície exposta. Até matérias extremamente

nobres, com alta dureza, como o vidro, diamante e outros, não resistem a processos severos de cavitação. Estudos buscam saber como os materiais reagem ao ataque da cavitação e como classificá-los. Chegou-se a uma classificação de materiais em dois tipos principais: conforme seu modo de deformação e; erosão durante o processo de cavitação. Os materiais dúcteis, como os aços inoxidáveis austeníticos, apresentam pequena perda de massa por longos períodos de ensaio, período em que apresentam deformação plástica em taxas que dependem de sua dureza inicial e propriedades mecânicas. Já os materiais frágeis não apresentam deformação inicial e a perda de massa ocorre nos períodos iniciais do ensaio.

Independente do tipo de ensaio e do material submetido à cavitação, o desenvolvimento de erosão em relação ao tempo de ensaio ocorre, normalmente, em quatro fases distintas, como pode ser observado na figura 2-3.

Observa-se que existe uma forte dependência entre o desempenho a cavitação e o tempo de ensaio. Esta dependência foi observada em diferentes tipos de ensaio e/ou matérias e pode ser dividida em quatro fases principais [1]:

a) Incubação: tempo durante o qual o material apresenta pequena ou nenhuma perda de peso.

b) Acumulação: o material absorve energia de impacto da implosão, levando ou surgimento de trincas e remoção de partículas que ocorre de forma gradual.

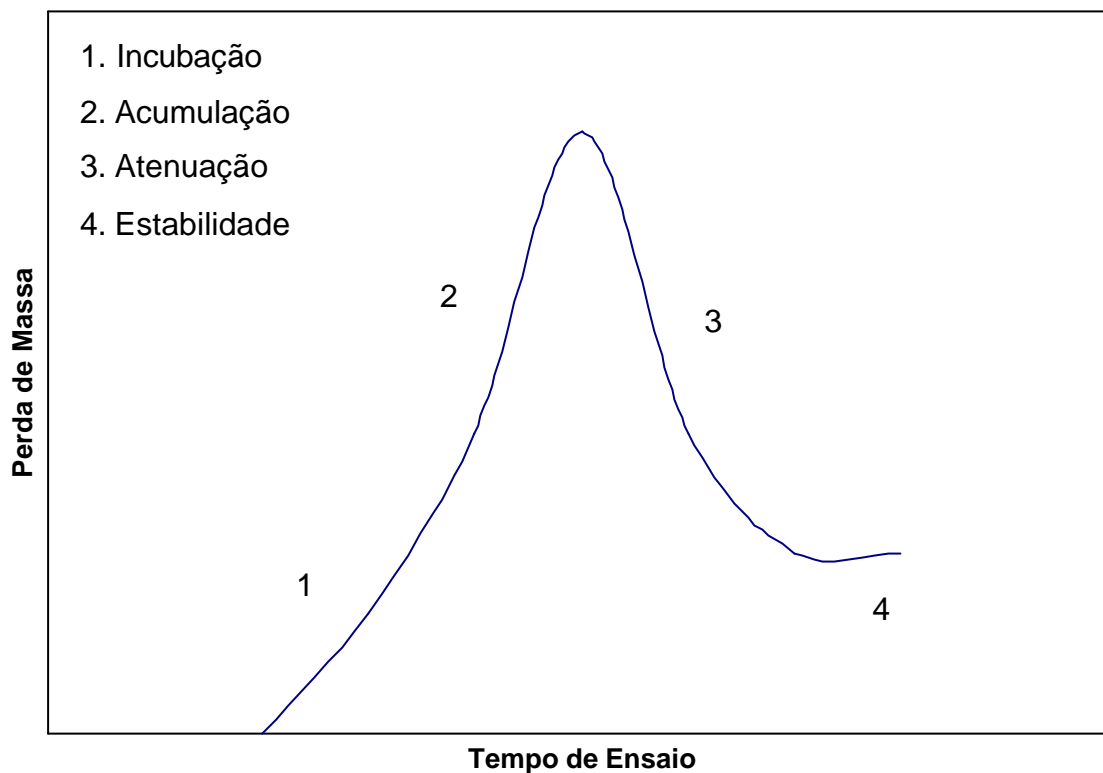


Figura 2-3: Perda de peso por unidade de tempo em função do tempo de ensaio – curva típica [1]

c) Atenuação: a taxa de erosão atinge um máximo e começa a diminuir. Aparecem crateras isoladas e profundas na superfície do material. A rugosidade elevada da superfície absorve parte da energia de impacto, diminuindo assim a taxa de erosão.

d) Estabilidade: A taxa de erosão torna-se quase constante.

2.2.1 Relação com as Propriedades Mecânicas

Em estudo sobre cavitação, Thiruvengadam [7] comparou o desempenho à cavitação de diversos materiais com suas propriedades mecânicas e chegou aos seguintes fatores de correlação (tabela 2-1):

Tabela 2-1: Correlações de Thiruvengadam [7].

Propriedade mecânica	Fatores de correlação
Energia de deformação	0,91
Resistência máxima	0,79
Limite elástico	0,65
Dureza Brinell	0,51
Modulo de elasticidade	0,49
Elongação máxima	0,48

A propriedade que apresentou o melhor resultado foi a energia de deformação, definida como sendo a área abaixo do diagrama tensão-deformação e que representa, portanto um “somatório” de propriedades, pois estão relacionadas mais de uma propriedade.

Rao e Kandasami [8] testando metais como o alumínio, cobre, aço carbono e inoxidável, chegaram a seguinte expressão relacionando resistência à cavitação e propriedades dos materiais:

$$\frac{V \times (U_r \times H)}{t} \cong \text{constante} \quad (2-1)$$

onde: V é o volume de material perdido por erosão,

U_r é a resiliência máxima,

H a dureza do material e

t o tempo de exposição ao teste acelerado de cavitação do tipo disco rotativo.

Richman e Mcnaughton [9] encontraram boa correlação entre taxas de erosão e parâmetros de deformação cíclica, significando que o dano por cavitação é um processo de fadiga. O parâmetro combinado entre coeficiente de resistência a fadiga com o expoente de endurecimento de deformação cíclica apresentou a melhor dependência. Este parâmetro é dependente também da energia de falhas de empilhamento, que esta ligada com modo de deformação dos materiais quando submetidos a tensões.

Procopiak [1] cita conclusões de outros trabalhos afirmando a existência de uma razoável tendência de aumento da resistência à erosão com a dureza, mas, que nenhuma relação direta com a dureza é possível para os materiais testados. Apresenta a relação (2-2) obtida por He e Hammitt, em que uma dependência direta existe entre resistência à cavitação e dureza, mostrando que a correlação principal é com a resiliência, sendo esta proporcional à dureza.

$$(\text{taxa de erosão})^{-1} \cong \frac{a \times (\text{Dureza})^2}{2E} \quad (2-2)$$

onde: E é o módulo de elasticidade do material, e;
a é uma constante.

Soares e outros [10] avaliaram a eficácia do *shot peening* sobre a superfície a ser exposta à cavitação para aumento localizado da dureza e indução de tensões superficiais de compressão. Eles conseguiram aumentos substanciais na resistência à erosão por cavitação em aços inoxidáveis austeníticos. Confirmando que a dureza é uma das propriedades dos materiais que mantém relação direta com a resistência à cavitação, quando considerados materiais de uma mesma classe.

As propriedades mecânicas dos materiais são normalmente medidas em baixas taxas de esforço, ou seja, de forma quase estática. Sabe-se que a cavitação produz efeitos de altas taxas de esforço, sendo um processo dinâmico e, portanto, deve-se buscar uma correlação com as propriedades dinâmicas, o que atualmente não se tem no presente estado de conhecimento desta matéria.

2.2.2 Mecanismo Microestrutural de Resistência

Outras características dos materiais, como a microestrutura e a composição química formam outra linha de pesquisa sobre a resistência à cavitação. Neste sentido, a estrutura cristalina, planos de deslizamento, camadas superficiais endurecidas, tamanho de grão, maclação, transformação de fase, precipitados, falhas de empilhamento entre outras, tem sido analisadas. Alguns materiais podem ser selecionados como tendo ótima resistência à cavitação em função de sua micro-estrutura, dentre eles destacam-se as ligas de cobalto [1].

Os motivos de estas ligas apresentarem alta resistência à cavitação não são de todo conhecidas. Entretanto, entre as características micro-estruturais dos materiais verifica-se que a estrutura monofásica austenítica, a baixa energia de falhas de empilhamento, a transformação de fase induzida por deformação ou combinação delas, estão diretamente relacionadas à resistência a cavitação.

2.2.2.1 Estrutura Cristalina

A estrutura monofásica tem sido identificada como fator importante na resistência à cavitação dos materiais. A remoção do material inicia normalmente nos contornos de grão ou de fases. Em materiais com precipitados pequenos, ela ocorre inicialmente com a remoção desses precipitados (Procopiak et all. [11]) No caso de aços inoxidáveis verifica-se que, na existência de duas fases, como exemplo austenita e ferrita, estas estruturas se comportam de maneira diferente. Segundo Iback [12], que estudou aços inoxidáveis de estrutura duplex (austenita

e ferrita), a erosão inicia na fase ferrítica e a taxa de erosão nesta fase é maior que na fase austenítica. O trabalho de Rao [8], com vários aços inoxidáveis, mostra resultados diferentes dos apresentados por Iback, pois a erosão tende a diminuir até teores de ferrita entre 30% e 50%, a partir do qual aumenta (figura 2-4).

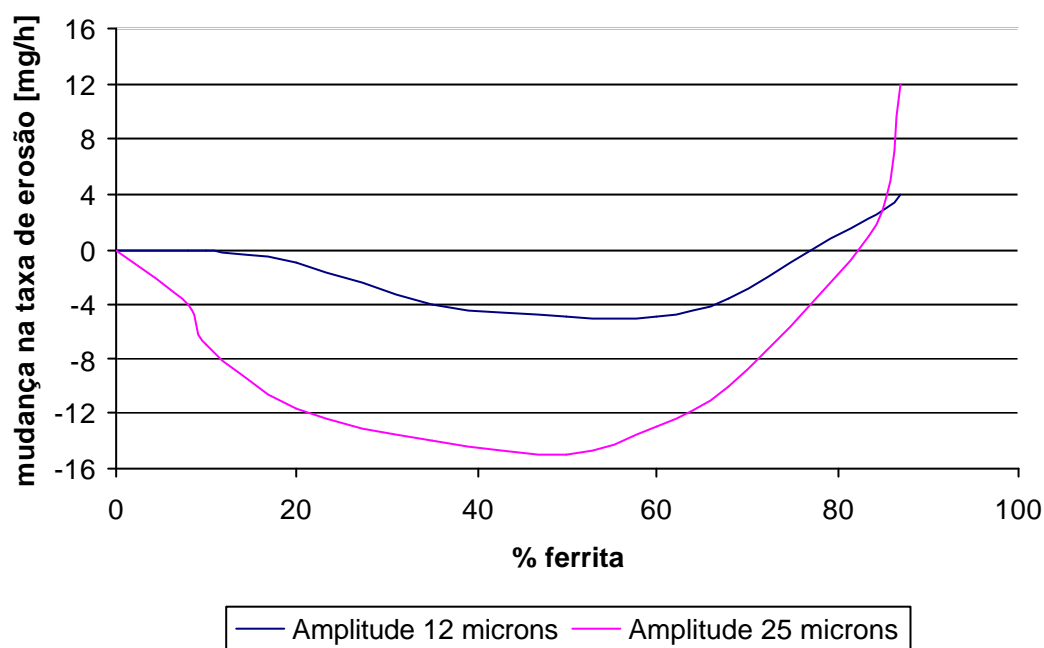


Figura 2-4: Efeito da % de ferrita na taxa de erosão em aços inoxidáveis com relação a estrutura austenítica pura [8].

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam outras características que é a sua metaestabilidade estrutural, ou seja, a estrutura inicialmente austenítica pode se transformar por ações de tensões, como no caso de cavitação. Uma das formas de medir esta metaestabilidade é através de temperatura em que ocorre o início da transformação martensítica M_s no resfriamento, se esta temperatura esta próxima da temperatura ambiente, haverá maior facilidade na ocorrência da transformação de fase.

Pela bibliografia [1], nota-se que todos os elementos de liga abaixam a temperatura de início da transformação martensítica. A influencia do cobalto não é

bem conhecida. Em ligas Fe-Ni e em aços maraging a adição de cobalto mostra uma tendência de aumento da temperatura M_s . Já em ligas Fe-Cr a tendência é contrária, ou seja, tende a diminuir a temperatura de transformação martensítica, mas de forma menos acentuada do que a adição de outros elementos de liga.

No caso dos aços austeníticos com transformações controladas, a temperatura de transformação martensítica esta próxima da temperatura ambiente, possibilitando assim que ela ocorra por trabalho à frio ou encruamento.

2.2.2.2 Transformação de Fase Induzida por Deformação

Em seu trabalho de revisão sobre transformação martensítica, Schumann [13] mostra as várias possibilidades de transformação, seja no resfriamento dos aços ou na deformação a frio. A transformação martensítica, como resultado da deformação a frio em aços austeníticos, mostra a metaestabilidade destes aços e possibilidade de se formar martensita acima da temperatura M_s (temperatura de início da transformação no resfriamento) como resultado de deformação plástica. A temperatura conhecida como M_d ($M_d > M_s$), representa a temperatura acima da qual nenhuma transformação ocorrerá por deformação. A transformação depende principalmente dos elementos de liga presentes e da tensão aplicada [1].

O resultado desta transformação nas características mecânicas destes aços, é que se podem obter melhorias nas características mecânicas como, maior resistência à tração, menor elongação, maior resistência a fadiga. A dúvida paira quanto a, se essa transformação de fase é incidental na boa resistência a cavitação das ligas que apresentam esta característica.

O aparecimento de mudanças de fases de materiais quando expostos a esforços e/ou deformação pode ser dividido em dois tipos principais [1]:

A transformação de austenita em martensita cúbica $\gamma \rightarrow \alpha'$

Um exemplo comum da transformação de $\gamma \rightarrow \alpha'$ ocorre nos aços inoxidáveis da “família” 18%Cr/8%Ni. A fase originalmente cúbica de face centrada (CFC), austenítica γ , transforma-se em martensítica α' , cúbica de corpo centrado (CCC), devido à deformação da rede cristalina, normalmente a baixas temperaturas. Esta transformação ocorre com pequena variação volumétrica.

A transformação de austenítica e martensita hexagonal $\gamma \rightarrow \epsilon$

Em 1929 [1], pesquisadores trabalhando com aços baixo carbono com 12 a 30% de Manganês encontraram, através de raios-X, uma fase ϵ com estrutura cristalina hexagonal. Em pesquisa de ligas ternárias Fe-Mn-Co concluíram que a transformação $\gamma \rightarrow \epsilon$ nestes aços é idêntica à transformação em cobalto puro.

Esta transformação foi revelada metalograficamente em aços ao manganês em 1963 e em aços cromo/níquel em 1964. A martensita ϵ se forma em plaquetas muito finas e alongadas, situada nos planos octaédricos da austenita. Sua estrutura cristalina é a hexagonal compacta HC. Em aços manganês até 80% da fase ϵ pode ser formada [13].

2.2.2.3 Transformação de Fase X Cavitação

Procopiak [1] cita vários autores que encontraram na transformação de fase induzida por cavitação um dos possíveis fatores para resistência à erosão, apresentada por algumas ligas. Menciona Woodford que utilizou o equipamento ultra-sônico de cavitação para ensaiar a liga de Cobalto, Stellite 6B e vários aços austeníticos, confirmando a ocorrência desta transformação de fase. A liga de

Cobalto, que apresentou a maior resistência à cavitação, mostrou também um rápido aumento da fase hexagonal compacta (HC) – martensita – na fase inicial do ensaio de cavitação, no período de incubação, quando a perda de peso é pequena. Para os aços austeníticos TRIP (Transformation-induced plasticity) também foi encontrada essa transformação de fase, sendo que para os materiais estabilizados com Manganês a fase martensita foi predominante, enquanto que os estabilizantes com níquel apresentaram a transformação de austeníticos para martensíticos.

Para Heathcock [1], que pesquisou o mecanismo de resistência e modo de erosão de aços inoxidáveis martensíticos, austeníticos e ferríticos utilizado o ensaio vibratório de cavitação. No caso dos aços austeníticos testados (AISI 304, 309 e 316 e o aço Hadfield) o que apresentou maior resistência foi o aço ao manganês tipo “Hadfield”, seguido do AISI 304 e por último o AISI 316. A boa resistência dos dois primeiros foi atribuída a característica de deformação destas ligas. No caso do AISI 304, inicialmente austenítico, após exposição a cavitação, foi identificada através de difração de raio X a ocorrência da fase martensítica. Esta transformação de fase induzida por deformação leva a um alto endurecimento e a maiores propriedades mecânicas. Portanto, boas características de endurecimento por deformação seriam fatores importantes para dar aos materiais melhor resistência a cavitação segundo os autores.

Finalmente, Levy e Crook [14] estudaram as propriedades de erosão de ligas de cobalto em relação a alguns aços inoxidáveis. Encontraram boas propriedades ao desgaste nas ligas de cobalto que acreditam ser influenciadas por:

- a limitada mobilidade das falhas de empilhamento geradas por tensões mecânicas, o que limita a deformação plástica;
- a interação entre falhas de empilhamento o que resulta num rápido endurecimento;
- a maclação mecânica, que ocorre pronunciadamente em alguns materiais, que envolve absorção de energia;

- a formação de fase HC, que se acredita também absorva energia;
- as características da fase HC formada, com maior resistência à fratura.

A influência da transformação de fase na resistência a cavitação tem relação com a estrutura formada e sua característica de deformação. A estrutura original austenítica e sua característica de metaestabilidade, levando à transformação de fase induzida por deformação parecem ter melhor resistência que as estruturas sem esta característica.

2.2.2.4 Energia de Falhas De Empilhamento

A energia de falha de empilhamento (EFE) pode ser descrita como a diferença de energia livre entre a estrutura austenítica e a fase martensítica. Portanto existe uma relação direta entre EFE e a fase martensítica. As falhas de empilhamento são os embriões para a fase martensítica durante a transformação.

Schumann [13] cita que a baixa energia de falhas de empilhamento é importante fator no desempenho da transformação martensítica em aços Fe-Mn, Fe-Mn-Cr, Fe-Mn-Ni, etc.

Materiais com baixo EFE terão características de deformação com reduzido deslizamento cruzado, maior separação entre as discordâncias parciais, e maior possibilidade de ocorrência de fase hexagonal compacta.

Portanto as características de estrutura monofásica, baixa energia de falhas de empilhamento, transformação martensítica induzida por deformação tem uma relação entre si, e são fatores importantes na boa resistência à erosão por cavitação [1].

2.3 Aspersão Térmica

2.3.1 Introdução

Conceitualmente, aspersão térmica se entende como o processo onde partículas fundidas, semi fundidas ou sólidas são depositadas em forma de spray sobre um substrato, resultando em um revestimento sobre a mesma. O material a ser depositado pode estar na forma de pó ou arames. A aspersão térmica geralmente necessita de uma fonte de calor, seja ela de uma chama ou de um arco voltaico, para realizar a fusão do material a depositar. Como o material é aquecido tende a se tornar fundido, semi fundido ou, até mesmo, com algumas partículas sólidas e é acelerando a partir da vazão de um gás (comumente ar comprimido).

A partícula lançada de encontro ao substrato (material ou peça que se deseja revestir), colidindo com o mesmo e se deformando preenchendo as irregularidades da superfície (rugosidade). Com o resfriamento ocorre a solidificação das partículas em estruturas lamelares conhecidas por panquecas, formando, assim, o revestimento (figura 2-5).

Os revestimentos aplicados através da aspersão térmica têm, principalmente, o objetivo de diminuir as taxas de desgaste e aumentar a resistência à corrosão dos materiais, peças e componentes estruturais.

O processo iniciou seu desenvolvimento a partir de 1910, tendo como precursor M.U. Schoop, de Zurique, quando foi apresentado a comunidade científica um equipamento que empregava arames metálicos como matéria prima, com alimentação uniforme através de ar comprimido e fusão do metal por meio de chama de gás. Inicialmente utilizava zinco como revestimento ao aço carbono.

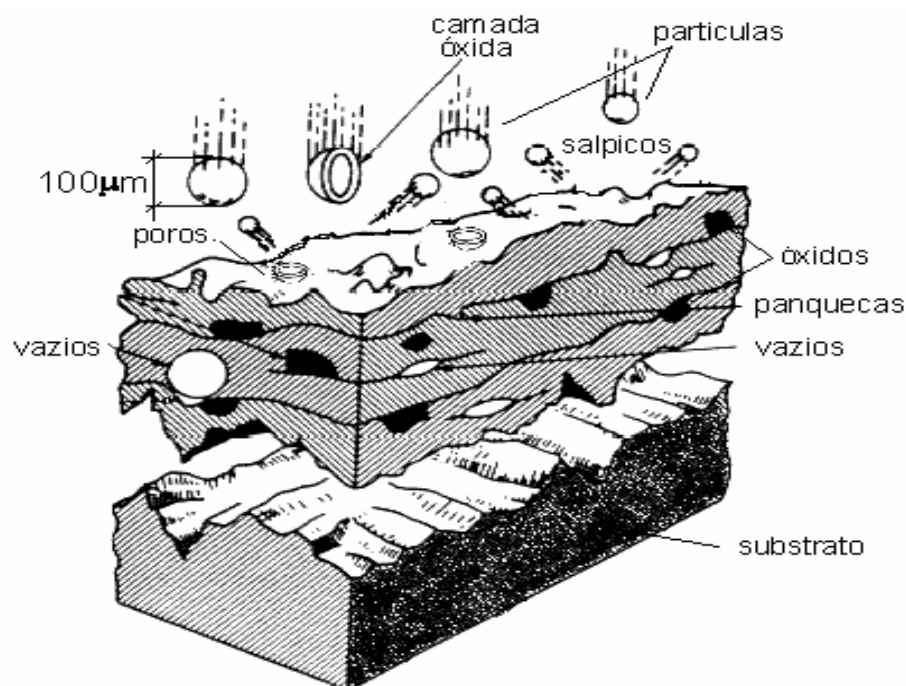


Figura 2-5: Características da formação da camada depositada por aspersão térmica [15, 16].

Em 1940 foi desenvolvido o primeiro tipo de pistola com alimentação por dois arames e calor gerado por arco voltaico. A partir dos anos 60 surgiram os processos de arco plasma e mais tarde os por detonação.

Na década de 80 surgiu o processo de alta velocidade (HVOF), permitindo a transferência de partículas a altas velocidades.

A partir dos anos 90, as indústrias visam melhorar a qualidade das deposições incrementando a velocidade de impulsão das partículas e a utilização de gases que não oxidem o material durante a deposição [15, 17].

2.3.2 Processo de Aspersão Térmica à Arco Elétrico

Também conhecido por ASP (Arc Spray Process), o processo à arco elétrico utiliza o calor gerado a partir de um arco elétrico para realizar a fusão do material a se depositar.

São usados dois arames como eletrodos consumíveis, e também, material de aporte, ligados a uma fonte de tensão. A diferença de potencial gerada pela fonte em cada um dos arames (um ligado ao pólo positivo e outro ao pólo negativo) induz o arco elétrico e funde o material no bocal da pistola de aspersão. Esse material é lançado, na forma de spray, por um jato de ar comprimido, de encontro ao substrato (figura 2-6).

A alimentação dos arames é feita por meio de um motor elétrico ou por uma turbina de ar comprimido, e a velocidade de avanço do mesmo é regulada em função da corrente induzida pela fonte.

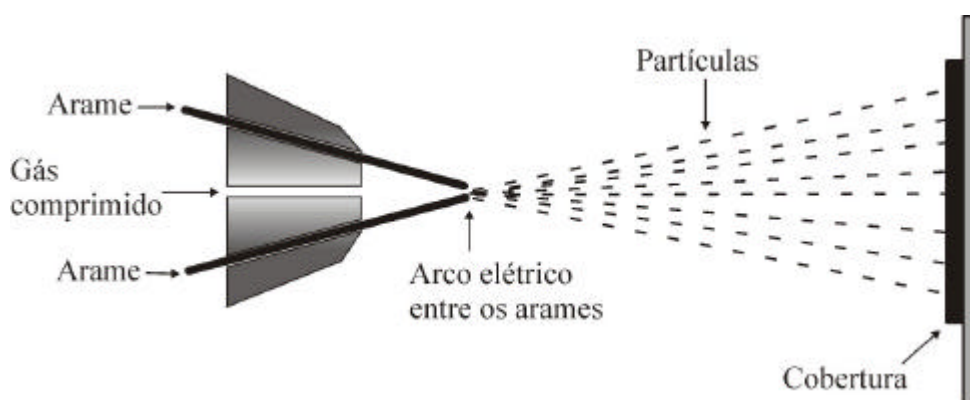


Figura 2-6: Esquema de funcionamento do processo por arco elétrico

As principais características do processo são apresentadas na tabela 2-2 a seguir:

Tabela 2-2: Características do processo de aspersão térmica à arco elétrico.

Características	Exemplos
Arames	Todos os tipos (sólidos e tubulares) que sejam condutores elétricos. Diâmetros comuns entre 1,6 e 5 mm
Potência elétrica	5-10 kW
Temperatura do arco	4000-6000°C
Velocidade das partículas	Até 250 m/s
Deposição	50-300g/min

Os principais parâmetros de regulação do equipamento são apresentados na tabela 2-3 a seguir:

Tabela 2-3: Parâmetros comuns do processo de aspersão térmica à arco elétrico.

Parâmetros	Exemplos
Distância de deposição	50-200 mm
Pressão do gás	0,2-0,7 MPa
Tensão	18-40V
Corrente	Até 300A
Limpeza da superfície	Sa3
Preaquecimento	Em média 120-150°C

2.3.3 Efeitos dos Parâmetros de Processo (ASP)

2.3.3.1 Gás de Arraste

Geralmente se usa o ar como gás de arraste das partículas. O ar oxida as partículas resultando em um alto nível de óxidos no revestimento. Uma grande quantidade de óxidos geralmente degrada a qualidade do revestimento; geralmente aumenta a dureza, mas afeta a adesão com o substrato e o interior da

panqueca. O ar gera o risco de acréscimo de porosidade e conseqüente redução da resistência à corrosão em meios líquidos e gasosos, que facilmente atravessam o revestimento atingindo o substrato. Ainda, o ar causa uma excessiva remoção de elementos de liga (por exemplo, C, Si, Mn e Cr) contidos no arame, que serviria para dar ao revestimento uma determinada composição que não será produzida.

Para reduzir a concentração de óxidos, misturas metano e ar (variando de 25 a 60% de metano) têm sido usadas como gás de arraste. Com essas misturas, tanto a oxidação quanto a remoção de elementos de liga são reduzidos. A baixa quantidade de óxidos aumenta a aderência, mas diminui a dureza do revestimento. A maior desvantagem dessa mistura é o perigo ocasionado por sua utilização. Entretanto, medidas de segurança podem ser tomadas para melhorar a operabilidade do equipamento.

Gases inertes, principalmente argônio e nitrogênio, também tem sido usados, tanto em “campo” como em “câmaras”, para reduzir a concentração de óxidos. Para um dado gás, têm-se menores taxas de oxidação em operações em câmaras às em campo. Entretanto, em operações em câmaras, têm-se menores oxidações usando Argônio ao invés de nitrogênio. Em operações em campo, utilizando nitrogênio, conseguem-se melhores resultados que os obtidos com o uso de ar.

No trabalho em campo, ao ar, que produz o nível máximo de oxidação, a microestrutura apresenta visivelmente óxidos no contorno de grão, com formação de áreas quebradiças entre as gotículas solidificadas. Nas outras combinações de parâmetros de gás e local de deposição, os contornos de óxidos não se apresentam tão pronunciados. Comumente a quantidade de óxidos presentes em uma combinação argônio/câmara é de um quarto se comparado ao ar/campo. Estudos mostram que, em revestimentos de ligas de aço Ni-Cr em campo, o teor de óxidos chega a 17,7% com ar, 9,4% com nitrogênio e 5,9% com argônio. Para

deposições de aço inox 420, o teor de óxidos chega a 19,9% com ar, 9,3% com nitrogênio e 7,6% com argônio.

A atomização com gás inerte diminui não só o teor de óxidos, mas também, reduz os níveis de nitrogênio contidos no revestimento. Isso ocorre porque o oxigênio promove a absorção de nitrogênio no metal fundido. Em estudos usando vários locais de operação (câmaras e campo) e gases de arraste, os teores de nitrogênio foram mínimos, até menores que os do próprio arame nas combinações câmara/argônio, que excluía a presença de oxigênio do revestimento. Pelo outro lado, em operações usando ar em locais aberto (campo), os níveis de nitrogênio foram máximos, até maiores que os utilizando nitrogênio em campo, mas excluindo oxigênio.

Outra vantagem no uso de gás inerte é a grande redução dos níveis de porosidade no revestimento. Para procedimentos usando câmara e argônio, o revestimento é quase livre de porosidade. Além disso, a eficiência do processo de deposição do metal é aumentada. Geralmente encontram-se eficiências da ordem de 57,9% usando ar, 66,8% usando nitrogênio e 61,9 utilizando argônio.

Entretanto a maior desvantagem em se utilizar gases inertes é a redução na dureza do revestimento frente a diminuição nos teores de óxidos. Aquela chega a apresentar valores, quando se usa argônio/câmara, da ordem de um terço do valor de dureza da operação em campo com ar comprimido [15, 16, 17, 18, 19].

2.3.3.2 Avanço do Arame e Corrente

A corrente e o avanço do arame estão intimamente ligados, pois o aumento de um resulta no aumento do outro. A maioria das máquinas de aspersão à arco elétrico permitem a regulação apenas da corrente ficando o avanço do arame

dependente dessa regulagem. O aumento da corrente resulta no aumento do avanço do arame.

Estudos mostram [19] que, o aumento da corrente aumenta a resistência entre camadas do revestimento. Além disso, elementos de liga sofrem maior fusão à baixas correntes (lento avanço do arame).

2.3.3.3 Voltagem

Para um dado material, o valor da voltagem afeta, principalmente, a estabilidade do arco. Para arames de alumínio, a vantajosa voltagem de 25V proporciona uma operação com arco estável, mas aumentando-se esse valor para algo como 30V ou 35V, o arco torna-se instável. Da mesma forma, para arames de aço inox, tem-se boa estabilidade com valores de 30V, tornando-se menos estável em altas voltagens de 35V e 40V.

A voltagem também afeta os níveis de tensão encontrados no revestimento. As altas voltagens associadas a baixas pressões de ar, tendem a produzir altos níveis de tensão nos revestimentos. Os altos níveis de tensão são associados ao grande aporte de calor juntamente às grandes partículas produzidas pela tensão. Os níveis de tensão também aumentam dependendo do tipo de material utilizado. Aços inox e aços de alto carbono também tendem a ter maiores níveis de tensões.

2.3.3.4. Fonte de oxidação no processo de aspersão térmica por arco elétrico.

No processo de aspersão térmica que utiliza ar comprimido como meio de transporte quando em contato com as elevadas temperaturas no arco elétrico ocorre dissociação do ar comprimido [16], por conseguinte, o meio de transporte é oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2), pelo que se espera a formação de óxidos e

nitretos dos constituintes que estejam sendo depositados por este processo. Segundo Rodriguez [20] os mecanismos que estão presentes no processo por arco elétrico são quatro e podem ser observados na figura 2-7. A pesquisa na qual foram verificados estes mecanismos considerou a utilização de ar comprimido, argônio e nitrogênio como gás de transporte, para avaliar a reação do alumínio quando fundido no arco elétrico, sendo importante considerar que o alumínio passiva instantaneamente formando de óxido de alumínio.

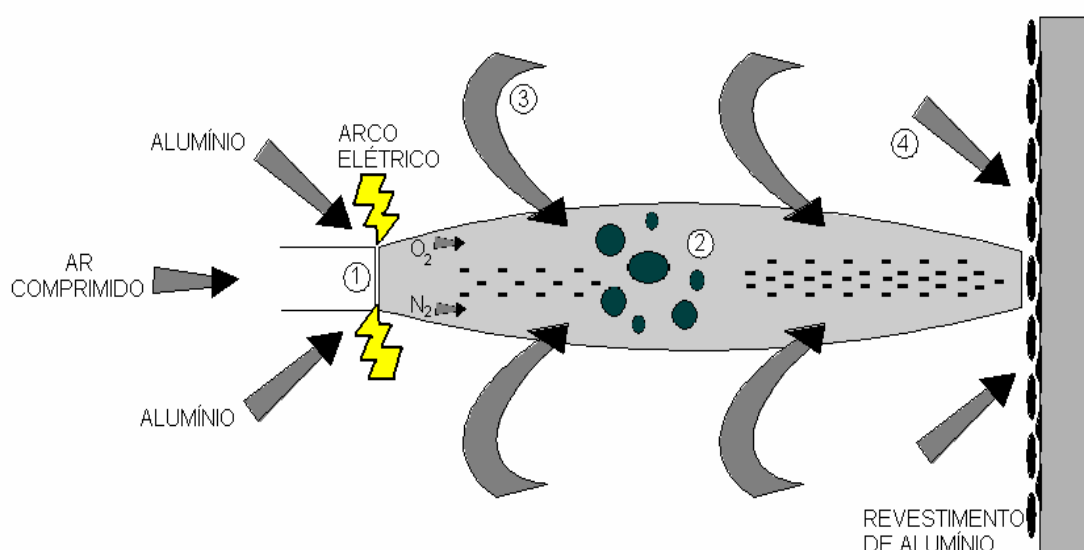


Figura 2-7: Esquema proposto das fontes/zonas de oxidação no processo ASP [20].

Os mecanismos identificados contidos na figura 2-7 são:

- 1- fonte de calor (arco elétrico),
- 2- gás de transporte
- 3- ar do meio ambiente, que envolve a zona de transferência, e;
- 4- ar do meio ambiente após deslocamento da pistola.

Esta reação está relacionada com as ligas que serão estudadas nesta pesquisa: as ligas de aço inoxidável AISI 309LT1 e 410NiMo. Estas possuem como principal constituinte o Cromo (Cr), que também é um material que passiva

na presença de oxigênio, o que deveria ser considerado na análise da resistência à cavitação dos revestimentos depositados por aspersão térmica por arco elétrico.

2.3.3.5 Distância de Aspersão

A taxa de fusão de elementos de liga e a eficiência de deposição são aumentadas com o aumento da distância de aspersão.

Entretanto a resistência do revestimento tende a ser maior e a porosidade menor a menores distâncias de aspersão. Normalmente apresentando uma distância ótima para cada caso. Tipicamente para aços carbono depositados à corrente de 150A, a resistência entre camadas aumenta de 62 N/mm² para 122 N/mm² com a diminuição da distância de aspersão de 195 mm para 40 mm [19].

2.4 Aspersão Térmica & Cavitação

Estudos recentes têm apresentado primeiros resultados sobre o comportamento de revestimentos depositados por aspersão térmica frente a cavitação.

Capra et al. [21] estudaram a modificação da morfologia, propriedades mecânicas e resistência à cavitação de revestimentos de AISI 309L, 410 NiMo e Cavitec ® (liga a base de cobalto) depositados por aspersão térmica à arco elétrico, variando alguns de seus parâmetros.

De modo geral verificou que o comportamento dos diferentes revestimentos depositados diante das alterações nos parâmetros de aspersão foi distinto, onde a liga com cobalto foi mais sensível às modificações, enquanto que a liga 410NiMo apresentou uma menor variação na morfologia com as modificações nos parâmetros. Adicionalmente pode observar que variações nos parâmetros de

deposição, pressão do ar, corrente e distância determinaram grandes modificações na morfologia dos revestimentos.

Em relação à variação da morfologia e teor de óxidos com a variação da pressão de ar-comprimido observou-se que com a redução desta há uma diminuição no teor de óxidos e um aumento na quantidade de gotas semifundidas no revestimento, assim como uma diminuição na quantidade de salpicos. Para a liga 309L a redução do teor de óxidos foi de 36 para 15% de óxidos e de 25 para 13% para a liga com cobalto, permanecendo praticamente inalterada em 25% para a liga 410NiMo para valores de pressão entre 40 e 80psi.

O aumento da corrente de 140A para 180A promoveu uma diminuição na quantidade de óxidos, 19 para 15%, para a liga com cobalto e de 33 para 23% na liga 309L, e num aumento do tamanho das panquecas depositadas. Para um aumento de corrente de 220A, para a liga 309L ocorreu um aumento na quantidade de óxidos presentes devido ao excesso de temperatura envolvido de 23 para 36% de óxidos.

A variação da distância de aspersão promoveu uma diminuição nos teores de óxidos para a liga cobalto. Quando se diminuiu a distância de aspersão de 200 para 120 mm ocorreu uma redução de 25 para 12% para um valor de pressão de 60psi.

Com relação à resistência à cavitação, a amostra da liga com cobalto que apresentou menor taxa de erosão foi aquela aplicada com a condição de menor pressão de ar comprimido. No período inicial de ensaio houve uma maior perda de massa nesta condição, comparada com a condição de maior pressão, mas houve estabilidade maior durante o ensaio, gerando assim uma menor taxa de perda de massa. A amostra de 309L que apresentou menor taxa de erosão refere-se a condição de pressão intermediária, onde a maior aderência entre as panquecas foi responsável pela menor taxa de erosão. A amostra de 410 NiMo

apresentou maior taxa de erosão das três ligas ensaiadas, apesar de ser a que apresentou menor influência na variação dos parâmetros de deposição.

2.5 Aço Inoxidável Martensítico Macio CA-6NM

Os aços inoxidáveis martensíticos convencionais são essencialmente ligas Fé-Cr-C com teores de cromo situados entre 11,5 e 18% e, de carbono entre 0,1 e 1,2% [2, 3]. São aços capazes de serem endurecíveis por têmpera.

São aços resistentes à cavitação, com moderada resistência à corrosão, ampla faixa de resistência mecânica, de baixo custo, porém de baixa soldabilidade.

A baixa soldabilidade se deve às possíveis trincas a frio (por hidrogênio) e, devido a sua estrutura martensítica, alta dureza na zona termicamente afetada.

Os aços inoxidáveis martensíticos macios surgiram no final da década de 1950. Seu desenvolvimento objetivava melhorar a soldabilidade dos aços inoxidáveis martensíticos convencionais, além de possuir boa resistência à cavitação para ser usado em rotores de turbinas hidráulicas [3].

No final da década de 1980, definiu-se a família dos aços inoxidáveis martensíticos macios como sendo formada por aços contendo um teor máximo de 0,08% de carbono, 12 a 17% de cromo, 3,5 a 6% de níquel e até 2,5% de molibdênio [3].

O aço inoxidável martensítico macio CA-6NM, segundo a norma ASTM A 743-93 [22], possui a composição química apresentada na tabela 2-4 e propriedades mecânicas (consideradas para aços temperados e revenidos entre 565 e 620°C) conforme a tabela 2-5:

Tabela 2-4: Composição química do aço CA-6NM.

Elemento	% em peso
Carbono	0,06 máximo
Manganês	1,00 máximo
Silício	1,00 máximo
Enxofre	0,03 máximo
Fósforo	0,04 máximo
Cromo	11,5 – 14,0
Níquel	3,5 – 4,5
Molibdênio	0,4 – 1,0

Tabela 2-5: Propriedades mecânicas do aço CA-6NM (valores mínimos exigidos).

Resistência à Tração (MPa)	Tensão de Escoamento (MPa)	Alongamento (%)
755	550	15

Para os aços inoxidáveis fundidos, a letra C denota o uso para resistir à corrosão. A segunda letra (no caso A) indica nominalmente os teores de cromo e níquel (varia de A até Z conforme aumentam esses teores). Os números que se seguem indicam o máximo teor de carbono ($\% \times 100$). Finalmente os elementos de liga são indicados pela primeira letra correspondente a cada elemento. Resumindo, para o aço CA-6NM tem-se um aço para resistir à corrosão, tipo 13% de cromo, com um teor máximo de 0,06% de carbono e, ligado com níquel e molibdênio.

Como citado anteriormente, os aços inoxidáveis martensíticos macios possuem uma soldabilidade superior aos aços inoxidáveis martensítico convencionais. Apesar disso são citados muitos cuidados que se deve seguir para realizar a soldagem nesses aços, tais como [2,3]:

- Utilizar eletrodo similar, contendo no máximo 0,04% de carbono para evitar a dureza elevada na região da solda;
- Eletrodos revestidos e fluxos (caso de soldagem por arco submerso) devem ser previamente aquecidos conforme orientação do fabricante (normalmente acima de 300°C) durante duas horas antes da soldagem. Isso para evitar penetração de hidrogênio na solda, causando trincas à frio;
- Para componentes de grandes espessuras (acima de 20 mm) utilizar pré-aquecimento de aproximadamente 100°C;
- Manter a temperatura de interpasse entre 100 e 150 °C;
- Quando desejado altos valores de resistência ao impacto, tenacidade à fratura e resistência à fadiga, faz-se necessário a realização de tratamento térmico posterior à soldagem, como revenido ou têmpera e revenido.

2.6 Planejamento de Experimentos

A pesquisa científica sempre se baseou na premissa de variar um fator ou variável por vez, permanecendo fixos os demais. Isso gera o dispêndio de muitas experiências e não possibilita a identificação de, se um efeito é devido a mudança de um único parâmetro ou da combinação de vários. Nesta pesquisa, utilizar essa metodologia seria muito trabalhoso e demorado, devido a grande quantidade de variáveis envolvidas em cada análise.

Os chamados planejamentos de experimentos saturados ou completos, onde todas as combinações possíveis são estudadas, são muito utilizados em trabalhos onde se busca alta precisão de resultados. Levando, ainda mais, a maiores gastos de recursos para obter-se resultados.

Uma forma de unir uma boa análise de influência de cada fator e suas combinações com economia de tempo e recursos em experimentos é a utilização de fatoriais fracionados, ou seja, frações de experimentos completos onde todos os fatores variam simultaneamente segundo um plano escolhido. Uma boa escolha resulta na possibilidade da determinação da influência de cada parâmetro e da combinação dos mesmos. Isso se traduz em um experimento mais eficiente diante dos anteriores. Por eficiente, neste caso, se entende como uma boa precisão dos resultados aliada a um número bem menor de observações ou ensaios [16].

Esse método serve para avaliações com fatores de vários níveis, destacando-se para estudos iniciais de um experimento, os métodos de fatores variando em dois níveis. Quando se suspeita de uma influência não linear de cada fator, pode-se utilizar uma maior quantidade de níveis para cada fator, sempre pagando o preço do aumento no número de experimentos a serem efetuados.

Baseado nesses conhecimentos, Taguchi [16,23] formulou métodos experimentais usando os modelos fracionados, posteriormente chamados de Técnicas de Taguchi ou planejamento robusto.

A utilização do planejamento de experimentos pode contribuir com o desenvolvimento industrial, além do meio acadêmico, pela otimização das grandezas de interesse em processos de fabricação, da determinação dos fatores influentes sobre essas grandezas, eventualmente das suas interações e pela minimização dos efeitos da variabilidade sobre o desempenho de um processo ou de um produto.

O planejamento de experimento possui como principais vantagens:

- diminuição do número de ensaios;
- estudo de um número considerável de fatores;
- detecção das interações entre os fatores;

- detecção dos níveis ótimos;
- melhoria da precisão dos resultados;
- otimização dos resultados.

2.6.1 Técnicas de Taguchi

Nos anos 80, Taguchi desenvolveu uma filosofia que introduz a planificação experimental que visa planificar produtos ou processos de tal modo que sejam robustos em relações as condições ambientais, as variações de componentes e minimizar as variações ao redor de um valor requerido e determinado [23].

Estudos mostram a eficácia e eficiência desta metodologia. [16, 24].

Teoricamente, a estrutura básica é um arranjo ortogonal de s níveis, simbolizado por $OA_N(s^m)$, é uma matriz $N \times m$ cujas colunas têm a seguinte propriedade: cada par de colunas possui todas as combinações possíveis entre os níveis, aparecendo um número fixo de vezes dentro do arranjo ortogonal. O primeiro passo consiste em selecionar adequadamente, da tabela de arranjos padrão de Taguchi (tabela 2-6), o arranjo mais adequado ao experimento a ser realizado. Como exemplo, a tabela 2-7 a seguir, mostra o arranjo $OA_8(2^7)$, em que aparecem as combinações (0,0), (0,1), (1,0) e (1,1) duas vezes [16].

Tabela 2-6: Arranjos ortogonais padrão [16].

Arranjo Ortogonal	Número de Experimento s	Máximo Número de Fatores	Máximo número de colunas na matriz			
			2 níveis	3 níveis	4 níveis	5 níveis
L4	4	3	3	—	—	—
L8	8	7	7	—	—	—
L9	9	4	—	4	—	—
L12	12	11	11	—	—	—
L16	16	15	15	—	—	—
L16	16	5	—	—	5	—
L18	18	8	1	7	—	—
L25	25	6	—	—	—	6
L27	27	13	—	13	—	—
L32	32	31	31	—	—	—
L'32	32	10	1	—	9	—
L36	36	23	11	12	—	—
L'36	36	16	3	13	—	—
L50	50	12	1	—	—	11
L54	54	26	1	25	—	—
L64	64	63	63	—	—	—
L'64	64	21	—	—	2	—
L81	81	40	—	40	—	—

Tabela 2-7: Arranjo ortogonal $O_{A_8}(2^7)$.

Exp.	COLUNAS DE FATORES						
No.	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1

Taguchi usa as numerações (1, 2, 3...) para designar os níveis de cada um dos fatores em estudo.

Uma das características da metodologia dos arranjos ortogonais de Taguchi é que as colunas à esquerda mudam menos freqüentemente que as mais à direita, ignorando o caráter aleatório. Devido a isso, quando se usa experimentos com múltiplos fatoriais, costuma-se associar às colunas mais à esquerda os fatores de maior custo ou maior dificuldade de variação, ganhando em tempo entre ensaios e custo total da experiência.

3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este trabalho visa estudar a viabilidade da deposição por aspersão térmica à arco elétrico das ligas AISI 309LT1 e AISI 410 NiMo para o revestimento do aço CA-6NM. Dessa otimização, avaliar o comportamento desses revestimentos depositados frente à cavitação e compará-los ao comportamento de uma liga tradicional: Cavitec®, também depositado por aspersão térmica à arco elétrico.

Durante 6 meses, efetuou-se o treinamento no equipamento de aspersão térmica, a fim de o autor ter total domínio sobre seu funcionamento e prática de deposição.

Para encontrar os melhores parâmetros de deposição do aço inox AISI 309L T1 e AISI 410 NiMo, foram feitas diversas deposições, seguindo análises da bibliografia e sugestões dos fabricantes de arames, em chapas finas e posterior ensaio de dobramento a fim de verificar a gama de possíveis parâmetros de deposição ótima.

Sabendo-se os parâmetros que apresentavam melhores resultados no ensaio por dobramento, se passou à implementação de um sistema de planejamento de experimentos utilizando as Técnicas de Taguchi buscando a otimização da deposição. Definiram-se como parâmetros de resposta, a porosidade dos corpos de prova e teor de óxidos.

De acordo com testes preliminares, foram selecionados os níveis para os sete fatores de aspersão térmica à arco elétrico a serem estudados e, de acordo com a metodologia de Taguchi, foi selecionado o arranjo L8 que permite estudar o efeito sobre a porosidade e teor de óxidos com dois níveis em cada fator. A escolha do parâmetro **corrente** se deve à necessidade de avaliar o efeito da variação de consumo de arame; a **tensão** permite obter variações no tamanho da gota transferida; escolheu-se a **espessura do revestimento** para estudar se o

aumento da espessura e do efeito de um maior aquecimento do substrato e revestimento influenciara na aderência e porosidade; a **pressão do ar** influencia a maior ou menor formação de óxidos, muito importantes neste trabalho; o **estado do abrasivo** e o **pré aquecimento** permitem avaliar a influência deste sobre a aderência e porosidade do revestimento ao substrato e; a **distância de aspersão** foi escolhida por influenciar na disposição das panquecas e, conseqüentemente, na porosidade e formação de óxidos.

Foram, então, confeccionados oito corpos de prova para cada liga, baseados no arranjo ortogonal de Taguchi (tabela 2-7).

As amostras foram cortadas e avaliadas em microscópio óptico. As fotos foram analisadas pelo software Clemex Vision. Este software possui uma ferramenta de avaliação de imagens. Através de uma rotina, implementa-se novas cores à figura, baseadas na intensidade da tonalidade de determinadas regiões. De um espectro que varia de 0 até 225, seleciona-se as tonalidades que representam poros e óxidos. O programa também permite o cálculo das áreas envolvidas, ou seja, o percentual de poros e óxidos em cada amostra.

Essa análise foi repetida três vezes em cada amostra, para minimizar erros. Conforme análise do desvio de cada medição pode-se concluir que esse número era suficiente para se ter resultados confiáveis.

De posse dos dados de porosidade e conhecendo-se os métodos de Taguchi, implementa-se o software estatístico SADIE. Este software apresenta como resposta, as influências (em forma de gráfico) de cada uma das variáveis (parâmetros) do estudo.

Após os resultados de otimização de deposição, utilizando os resultados que minimizam a porosidade, confeccionou-se corpos de prova para a avaliação de resistência à cavitação dos revestimentos aspergidos.

3.1 Processo de Aspersão Térmica

3.1.1 Materiais

3.1.1.1 Arames para Deposição

Os arames usados no processo de aspersão térmica foram os apresentados na tabela 3-1:

Tabela 3-1: Arames usados no procedimento experimental (dados fornecidos pelos fabricantes).

Arame	Bitola [mm]	Composição [% peso]								
		C	Cr	Ni	Co	Si	Mn	Mo	S	Fe
309L T1	1,6	0,021	22,8	12,3	--	0,68	1,35	--	0,004	Bal.
410 NiMo	1,2	0,026	12,40	3,7	--	--	0,64	0,42	0,0018	Bal.
Cavitec	1,6	0,19	17,0	0,88	8,3	2,03	8,30	--	0,01	Bal.

3.1.1.2 Substratos

Os modelos de substratos ou corpos de prova (CP's) utilizados foram:

O primeiro em chapa fina de aço carbono ASTM 1020 com medidas 50x75x1,25 mm, usados no ensaio de dobramento.

Para os demais ensaios e análises, foram construídos CP's em aço carbono ASTM 1020 com as mesmas dimensões, porém de uma polegada de espessura. Destes corpos de prova foram feitos espécimes menores para ensaio acelerado de cavitação.

Durante os ensaios preliminares, percebeu-se que a substituição do aço CA-6NM por aço ASTM 1020 não traria nenhum prejuízo aos resultados

experimentais. Devido a isso associado a dificuldade de obtenção e custo do aço CA-6NM, optou-se pelo ASTM 1020.

3.1.1.3 Abrasivo para Jateamento

Utilizou-se abrasivo de óxido de alumínio branco, granulometria 30.

3.1.2 Equipamentos

3.1.2.1 Jateamento

Antes de efetuar a deposição é necessária a limpeza e indução de rugosidade nos corpos de provas. Para isso foi usada a cabine de jateamento CVM com abrasivo do tipo óxido de alumínio branco, granulometria 30.

Seguiram-se as recomendações da norma SIS 055900/1967 e grau de limpeza Sa3 (norma NACE 1).

3.1.2.2 Rugosidade

A medição da rugosidade, induzida pelo jateamento, foi realizada com o auxílio do Rugosímetro MITUTOYO SJ-201 (figura 3-1).

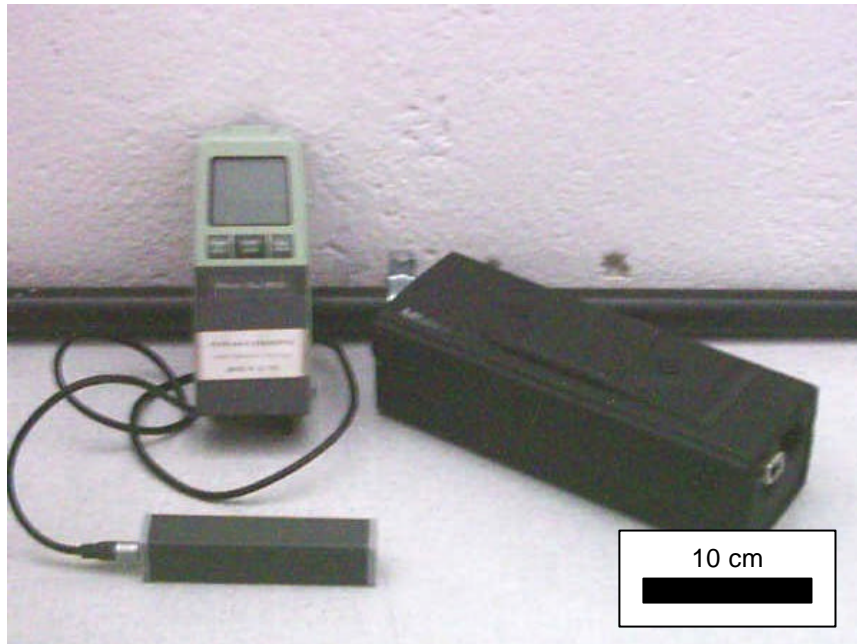


Figura 3-1: Rugosímetro

O processo de medição incluiu, também, como regra, três direções de medida da rugosidade: uma longitudinal (a), uma transversal (b) e a última, diagonal (c) conforme a figura 3-2.

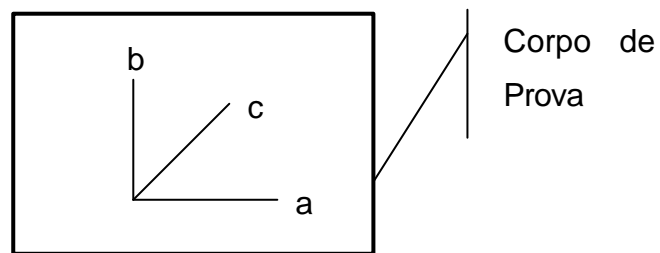


Figura 3-2: Sentidos de deslocamento do rugosímetro no corpo de prova

Nas medições de rugosidade são avaliadas quatro grandezas (figura 3-3):

- R_a : desvio médio aritmético;
- R_z : altura das irregularidades em dez pontos;
- R_y : altura máxima das irregularidades;
- R_{Sm} : espaçamento médio das irregularidades nas medições horizontais.

Dessas, as mais representativas para a aspensão térmica são R_y e R_{Sm} .

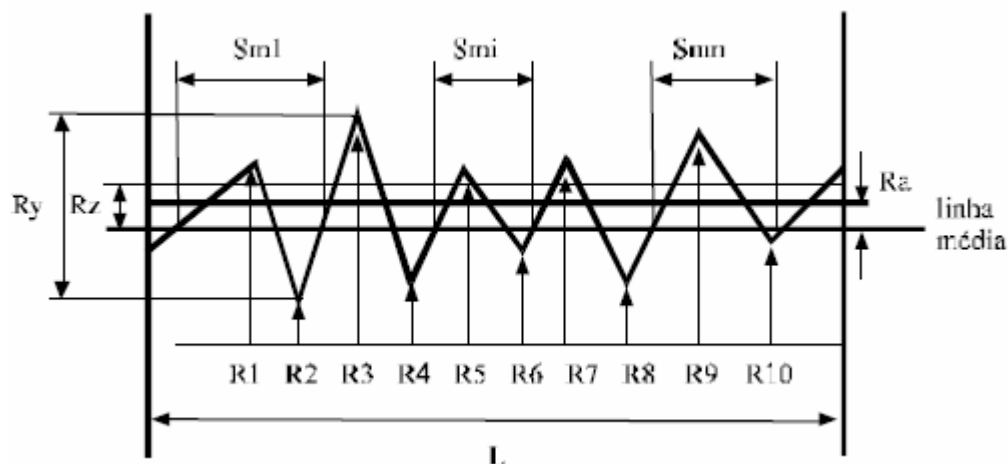


Figura 3-3: Medidas de rugosidade.

Foram jateadas oito amostras para cada otimização (16 no total) utilizando o arranjo L8 para verificar a rugosidade obtida, utilizando abrasivo novo e usado.

3.1.2.3 Deposição

A deposição dos revestimentos foi realizada no Laboratório de Aspensão Térmica da Universidade Federal do Paraná, utilizando-se a máquina de aspensão térmica ValueArc™ 300 de fabricada pela empresa Sulzer Metco (figura 3-4). Essa máquina permite a utilização de arames contínuos de diâmetro 1,6mm, sendo feita uma adaptação para utilizar, também, arames de 1,2mm de diâmetro.

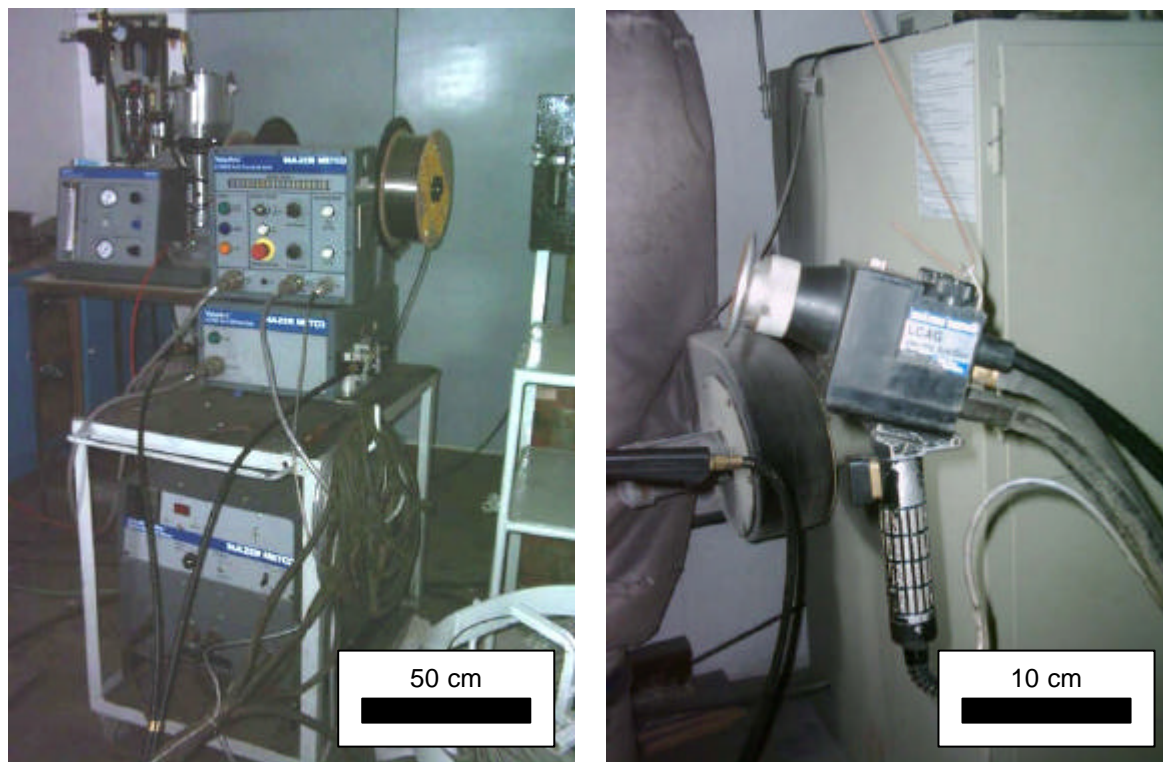


Figura 3-4: Máquina de Aspersão à Arco Elétrico ValueArc 300 (esquerda) e pistola de deposição (direita)

O processo foi realizado de forma manual onde os parâmetros de distância de deposição foram controlados com o auxílio de gabaritos.

Utilizou-se, também, uma câmara de pintura com exaustor e cortina de água para eliminar respingos de material e fumaças (figura 3-5).



Figura 3-5: Câmara de pintura

3.1.2.4 Pré-Aquecimento

Nas peças que necessitassem (segundo a matriz de deposição), o pré-aquecimento foi realizado com o auxílio de maçarico a gás sendo a temperatura controlada pelo medidor de temperatura por contato GULTerm 1200 da empresa GULTOM DO BRASIL LTDA e pelo pirômetro Raynger ST Pro (figura 3-6).



Figura 3-6: Medidores de Temperatura

3.1.2.5 Medição de Espessura

O controle da espessura de revestimento das amostras foi feito com o aparelho MITUTOYO DIGI-DERM, que trabalha em função da distância até alguma superfície magnética (figura 3-7).



Figura 3-7: Medidor de espessura

3.2 Caracterização

3.2.1 Ensaio de Dobramento

Esse ensaio serviu para identificar os conjuntos de parâmetros que apresentavam melhores resultados de deposição. A aderência no ensaio de dobramento foi o fator de avaliação dos pré-testes.

O ensaio de dobramento utilizou um equipamento (figura 3-8) montado no próprio Laboratório de Aspersão Térmica da UFPR seguindo as recomendações da norma MIL 2138 A.



Figura 3-8: Equipamento para ensaio de dobramento.

O ensaio de dobramento fornece uma avaliação qualitativa da ductilidade, com a apresentação ou não de trincas na superfície da camada. A metodologia do

ensaio segue estritamente o recomendado pela norma MIL 2138 A [25] e Petrobrás N-2568 [26].

Os parâmetros para o ensaio de dobramento utilizando estas normas são descritas na tabela 3-2 e os critérios de avaliação constam da tabela 3-3

Tabela 3-2: Parâmetros utilizados nos ensaios de dobramento.

Dimensões dos corpos de prova	1,25x50x75mm
Velocidade de avanço do cutelo	1,25x10-3m/s (medição aparelho portátil)
Diâmetro do cutelo	13 mm
Diâmetro dos apoios	32 mm
Distâncias entre apoios	22 mm
Ângulo de dobramento	180º
Espessura da camada depositada	entre 175 e 250µm

Tabela 3-3 Critério de avaliação dos ensaios de dobramento para aprovação das camadas.

Condição	Aparência da superfície
Ideal	Sem micro trincas, ou micro trincas superfícies.
Marginal	Contém micro trincas, sem desgarramento ou delaminação da camada.
Rejeitada	Contém trincas e fendas com desgarramento e delaminação da camada.

3.2.2 Metalografia

A análise de metalografia óptica fornece os subsídios indispensáveis à otimização dos parâmetros de revestimentos.

Para a análise metalografica da estrutura do material depositado, utilizou-se do Microscópio Olympus BX 51M.

Nesta análise pode-se observar a porosidade do material depositado, a sua microestrutura e espessura de camada.

A análise quantitativa de porosidade e teor de óxidos foi realizada com o auxílio do *software* Clemex.

3.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura e EDS

A análise de microscopia eletrônica auxilia na identificação do mecanismo de cavitação e o EDS fornece o tipo e quantidades de cada elemento componente nas diversas regiões do material

A análise de MEV-EDS foi realizada no laboratório de materiais do LacTec, utilizando um equipamento Philips XL 30. Utilizou-se as amostras erodidas após o ensaio de cavitação.

3.3 Planejamento de Experimentos

Sabendo-se da importância do planejamento de experimentos e, a objetividade na busca de resultados que essas técnicas proporcionam, utilizou-se dos Métodos de Taguchi para melhorar o desenvolvimento deste trabalho.

Optou-se pela matriz de sete parâmetros a serem investigados com dois níveis cada. O número de amostras a ser preparada a cada otimização é de apenas oito. Escolheu-se esta configuração por apresentar a quantidade de parâmetros a serem estudados (sete) condizente as pretensões deste trabalho e, por adequar-se aos estudos iniciais de uma pesquisa onde se acredita que os efeitos das variações de parâmetros são aproximadamente lineares

Dos pré-testes (ver ensaio de dobramento), os parâmetros de deposição a serem otimizados foram os definidos na tabela 3-4 e as matrizes de Taguchi nas tabelas 4-2 e 4-3.

Tabela 3-4: Parâmetros a serem estudados

Parâmetro	Unidade
Corrente	A
Voltagem	V
Espessura do revestimento	µm
Pressão do Ar	psi
Estado do Abrasivo	Nunca utilizado (novo); utilizado mais de 10 min (usado)
Pré Aquecimento	°C
Distância de Aspersão	mm

Após a caracterização das amostras e obtenção de níveis de porosidade, o último passo foi a implementação do *software* estatístico SADIE. Este software,

especialmente preparado para avaliar processos de otimização por meio de Técnicas de Taguchi, forneceu a influência de cada parâmetro e qual o nível deste para obter-se a menor porosidade.

3.4 Ensaio de Cavitação

O procedimento para ensaio de cavitação foi realizado conforme a norma ASTM G 32, utilizando-se o equipamento ultra-sônico vibratório da Ostem Ultrasonics, aparelho Ultrasonic Cavitation Test Equipment USG-2000.

O equipamento consiste de um transdutor piezoeléctro que faz vibrar a ponta do sonotrodo na frequência de 20 kHz. O espécime está montado sob a extremidade vibrante, imerso em água destilada mantida à 21°C. A amplitude de vibração é de 0,05 mm (figura 3-9).



Figura 3-9: Equipamento para ensaio vibratório de cavitação.

Os corpos de prova foram pesados em balança de precisão de 0,1 mg, em intervalos regulares e a massa perdida foi registrada em função do tempo de ensaio.

Os corpos de prova a serem ensaiados serão aqueles que resultarem da minimização da porosidade segundo o planejamento de experimentos.

3.5 Corpo de Prova Revestido por Cavitec®

O corpo de prova revestido com liga especialmente desenvolvida para resistir a cavitação foi preparado com os seguintes parâmetros (tabela 3-5).

Tabela 3-5: Parâmetros de deposição da liga Cavitec®.

Corrente (A)	Tensão (V)	Pressão do ar comprimido(psi)	Distância de aspersão (mm)	Pré-aquecimento (°C)
180	30	40	120	100

Note-se que esses parâmetros não foram objeto de otimização, sendo os recomendados pelo fabricante.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Planejamento de Experimentos

Dos resultados dos testes preliminares, foram selecionados os parâmetros de deposição apresentados na tabela 4-1:

Tabela 4-1 – Níveis usados na deposição.

Parâmetro	Nível I	Nível II
Corrente [A]	140	180
Tensão [V]	26	30
Espessura do revestimento [μm]	250	500
Pressão do Ar* [psi]	50	70*
Estado do Abrasivo	Novo	Usado
Pré Aquecimento [°C]	20	120
Distância de Aspersão [mm]	100	200

*a deposição com AISI 410 NiMo utilizou pressões de 50 e 60 psi, essa última devido a instabilidade durante a deposição com maior pressão.

Para o aço inoxidável AISI 309L T1, os parâmetros utilizados na deposição foram os da tabela 4-2 e, corresponde à seleção do arranjo ortogonal L8 proposto por Taguchi:

Tabela 4-2 – Matriz de parâmetros de deposição AISI 309L T1.

CP	Corrente [A]	Tensão [V]	Espessura [μm]	Pressão do ar [psi]	Estado do Abrasivo	Pré aquecimento [°C]	Distância de aspersão [mm]
1	140	26	250	50	Novo	20	100
2	140	26	250	70	Usado	120	200
3	140	30	500	50	Novo	120	200
4	140	30	500	70	Usado	20	100
5	180	26	500	50	Usado	20	200
6	180	26	500	70	Novo	120	100
7	180	30	250	50	Usado	120	100
8	180	30	250	70	Novo	20	200

O procedimento para a otimização dos parâmetros de deposição do aço inox AISI 410 NiMo seguiu a mesma sequência de otimização do aço inox 309L T1. Nesse caso alterou-se apenas a pressão do ar comprimido, ficando os dois níveis em 50 e 60 psi. A redução do segundo nível de pressão de 70 para 60 psi foi necessária para melhorar a estabilidade do arco.

Os parâmetros utilizados nas oito amostras são apresentados na tabela 4-3:

Tabela 4-3 – Matriz de parâmetros de deposição AISI 410 NiMo.

CP	Corrente [A]	Tensão [V]	Espessura [μm]	Pressão do ar [psi]	Estado do Abrasivo	Pré aquecimento [°C]	Distância de aspersão [mm]
1	140	26	250	50	Novo	20	100
2	140	26	250	60	Usado	120	200
3	140	30	500	50	Novo	120	200
4	140	30	500	60	Usado	20	100
5	180	26	500	50	Usado	20	200
6	180	26	500	60	Novo	120	100
7	180	30	250	50	Usado	120	100
8	180	30	250	60	Novo	20	200

4.2 Rugosidade dos Substratos

Com o intuito de avaliar a influência da rugosidade obtida com abrasivo novo e usado, foram medidas as rugosidades nos corpos de prova dos oito experimentos a serem revestidos com cada um dos aços inoxidáveis.

As amostras utilizadas para a aspersão apresentaram as seguintes rugosidades após o processo de jateamento (tabela 4-4):

Tabela 4-4: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 309L T1.

Amostra	Ra	Ry	Rz	RSm
1	7,04	51,62	41,52	140,67
2	6,79	38,93	38,83	139,00
3	7,90	36,91	36,94	116,00
4	7,44	41,37	41,37	125,67
5	8,59	46,68	46,68	126,67
6	7,51	46,06	46,06	120,33
7	7,51	45,06	45,06	91,67
8	8,45	45,52	45,52	89,00

Tabela 4-5: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 410 NiMo.

Amostra	Ra	Ry	Rz	RSm
1	5,29	32,58	32,58	97,33
2	5,43	34,48	34,48	100,00
3	5,13	33,15	33,15	104,67
4	4,99	32,06	32,06	105,67
5	5,22	29,43	29,43	101,00
6	5,29	29,78	29,78	98,33
7	5,08	29,34	29,34	92,33
8	4,95	28,72	28,72	93,67

Nas tabelas 4-4 e 4-5 observa-se valores médios das três direções medidas. No anexo, encontra-se todos os dados obtidos nas medições.

Verifica-se que as amostras jateadas com abrasivo novo (1, 3, 6 e 8) tiveram tendência de maiores rugosidades, o que é esperado. Entretanto, as

amostras que utilizaram abrasivo já utilizado algumas vezes, ainda possuíram rugosidade adequada à deposição.

Deve-se salientar que todas as amostras demonstraram possuir grau de limpeza Sa3, independente da utilização de abrasivo novo ou usado. Os valores encontrados de rugosidade, apesar de um pouco inferiores aos dados históricos, são suficientes para manter a boa aderência do revestimento ao substrato [27].

Outro ponto a se destacar é a adaptabilidade que um resultado desses apresenta na prática: em usinas, têm-se grandes áreas a serem jateadas, o que demanda uma grande quantidade de abrasivo, se o abrasivo em questão for de boa qualidade, que não sofra grande degradação durante sua utilização, poderá servir a seu papel de gerar limpeza e rugosidade por mais tempo e, principalmente, mantendo a qualidade da limpeza.

4.3 Aderência por Dobramento

A aderência, medida através do ensaio de dobramento, para as amostras revestidas com aço inoxidável AISI 309L T1 apresentou-se satisfatória em todos os corpos de prova, excetuando-se os 5 (309L) e 6 (309L). Para as amostras revestidas com AISI 410 NiMo, todas foram classificadas como Ideal.

Tabela 4-6: Resultados do ensaio de aderência AISI 309L T1.

Amostra	Resultado
1	Ideal
2	Ideal
3	Ideal
4	Ideal
5	Marginal
6	Marginal
7	Ideal
8	Ideal

Esses resultados demonstram que as oito amostras experimentais são qualificadas para avaliar a porosidade e a aderência. Isto é importante destacar devido a que a aderência dos revestimentos ao substrato deve ser garantida para, que quando solicitado ao ensaio de cavitação, os revestimentos não sejam arrancados. O ensaio de dobramento é somente quantitativo, no entanto, é mais adequado que o ensaio de aderência por tração, muito dependente da qualidade do adesivo para colar os corpos de prova e, na maioria dos casos, a ruptura ocorre no adesivo. Além disso, o ensaio de aderência por dobramento submete ao revestimento a esforços extremos, superiores ao submetidos no ensaio de tração.

4.4 Microestrutura e Medição de Porosidade e Teor de Óxidos

4.4.1 Microestrutura Depositada com Arame 309L T1

Os corpos de prova preparados e fotografados no microscópio óptico podem ser observados na figura 4-1.

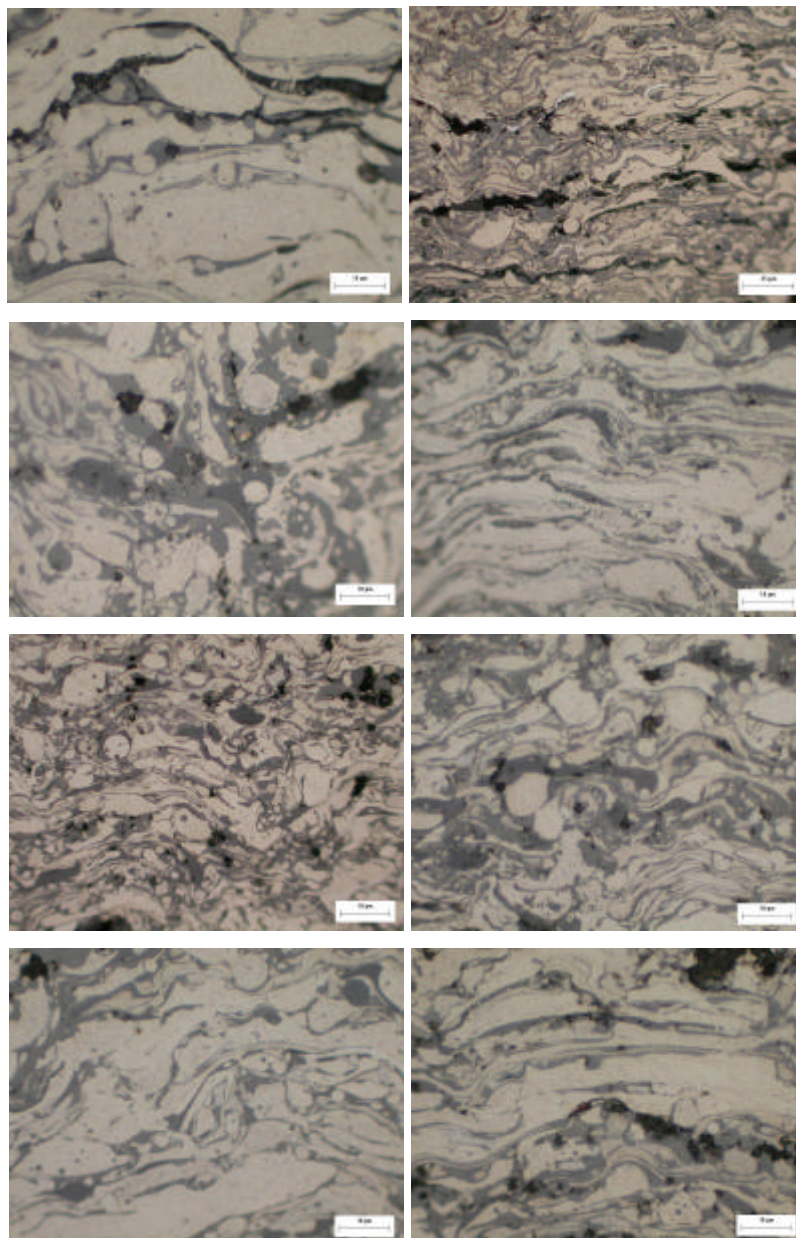


Figura 4-1: Microestrutura do revestimento de aço inoxidável AISI 309L T1

Na figura 4-1, observa-se a disposição típica de revestimentos aspergidos em camadas tipo panquecas, bastante homogêneas, espessas e com pequena quantidade de salpicos. Mesmo às pressões de ar mais altas (70 psi), não houve uma diminuição significativa na espessura das panquecas, importante para se ter baixos níveis de oxidação.

As regiões mais escuras são poros ou vazios, enquanto que as regiões cinza são óxidos formados pelo contato com o oxigênio do ar comprimido, tais como óxidos de cromo, silício e manganês.

4.4.2 Resultado das Medições de Porosidade e Teor de Óxidos do Revestimento 309I T1

A análise com o software Clemex apresentou os seguintes resultados para a porosidade (tabela 4-7) e quantidade de óxidos (tabela 4-8). Para cada amostra são apresentados os resultados de cada uma das três imagens analisadas.

Tabela 4-7: Porosidade dos revestimentos de 309 L T1.

Amostra	1° imagem [%]	2° imagem [%]	3° imagem [%]	Média [%]
1	2,4	3,3	1,8	2,5
2	9,0	5,8	8,0	7,6
3	1,2	0,3	1,1	0,9
4	1,1	2,9	0,6	1,5
5	2,8	2,6	2,6	2,7
6	1,6	1,5	0,9	1,3
7	1,0	0,6	0,7	0,8
8	4,3	2,8	3,5	3,5

Tabela 4-8: Óxidos dos revestimentos de 309 L T1.

Amostra	1° imagem [%]	2° imagem [%]	3° imagem [%]	Média [%]
1	4,3	4,1	4,7	4,4
2	5,0	4,4	4,7	4,7
3	1,4	1,0	1,4	1,3
4	3,0	3,9	1,0	2,6
5	4,5	5,7	4,2	4,8
6	3,9	3,7	2,4	3,3
7	3,0	4,1	3,8	3,6
8	3,6	4,2	4,0	3,9

Observa-se na tabela 4-7 que a menor porosidade medida corresponde as amostras 3 e 7 com 0,8 e 0,9% respectivamente. A maior porosidade foi da amostra 2 (7,6%). Destacando que estes valores devem ser considerados excelentes, quando comparados com dados da literatura [28, 29] que indicam para o processo de aspersão térmica por arco elétrico faixas de porosidade entre 10 até 20%.

Processados esses resultados de porosidade no software SADIE para matrizes de Taguchi com oito experimentos, sete parâmetros com dois níveis cada um, obtêm-se o gráfico apresentado na figura 4-2, que mostra a influência de cada parâmetro estudado na obtenção da menor porosidade.

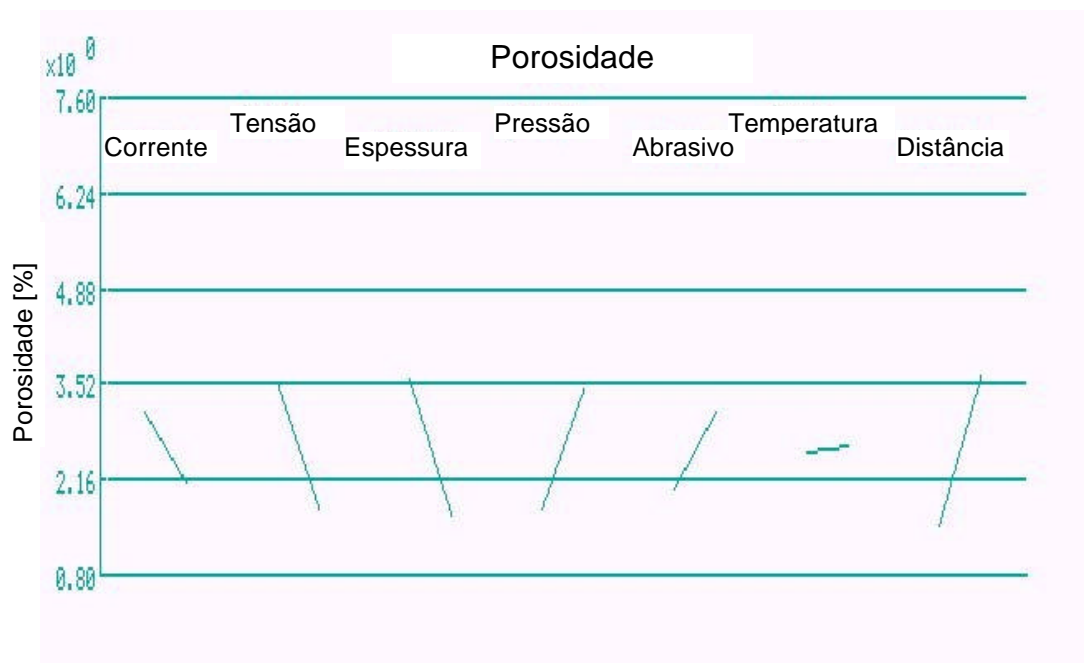


Figura 4-2: Resultado da análise do software SADIE para a porosidade do revestimento de AISI 309L T1.

Na coluna das ordenadas tem-se a porosidade e, para cada parâmetro, uma reta indicando sua influência. Quanto maior a reta, maior é a influência do parâmetro no fator de resposta (porosidade). O ponto à esquerda de cada reta representa o nível 1 para cada parâmetro, enquanto que o ponto à direita, o nível 2.

Da observação do gráfico da figura 4-2 podemos observar que são quatro os parâmetros que participam com maior influência: tensão, espessura dos revestimentos, pressão do ar comprimido e distância de aspersão.

A tabela 4-9 apresenta o percentual de influência de cada variável na porosidade do revestimento. Os dados completos estão no anexo.

Tabela 4-9: Resumo de ANOVA para o efeito sobre a porosidade na deposição de 309L T1.

Variável	Influência [%]
Corrente	6,3
Tensão	19,6
Espessura do revestimento	23,0
Pressão do ar	17,6
Estado do abrasivo	7,0
Pré aquecimento	0,06
Distância de aspersão	26,5

A otimização do procedimento de aspersão térmica por arco elétrico se dá pela escolha dos níveis que apresentam a diminuição da porosidade (neste estudo deseja-se a minimização). Em geral o gráfico da figura 4-2 e a tabela 4-9 nos mostram que a tensão (19,6%), a espessura do revestimento (23,0%), a pressão do ar comprimido (17,6%) e a distância de aspersão (26,5%) são os parâmetros mais importantes na obtenção da menor porosidade.

Analisando-se cada fator isoladamente, pode-se comentar:

- O fator **Corrente** possui pequena influência na porosidade. A menor porosidade se deve à maior corrente: observando a tabela 4-7, verifica-se que a média de porosidade à 140A é 3,1%, diminuindo para 2,1% em 180A. A maior corrente permite uma fusão maior de material, maior temperatura resultando na menor porosidade.
- O fator **Tensão** possui forte influência na diminuição da porosidade, maior a tensão, menor a porosidade. A grande influência se deve a que a maior diferença de potencial permite a formação de gotas maiores. Com panquecas maiores minimiza-se a porosidade;
- O fator **Espessura** apresentou grande influência do estudo, demonstrada por uma reta grande e inclinada para menor

porosidade em maior espessura. Isso se deve ao maior aquecimento produzido pelo maior tempo que o substrato fica exposto ao impacto das partículas à elevada temperatura;

- O fator **Pressão**, ao contrário do esperado, mostrou influência positiva na diminuição da porosidade com a menor pressão. Isso é possível porque a menor pressão do ar produz menor efeito de resfriamento e permite também que as partículas atinjam o substrato sem romper ou fragmentar, não formando salpicos que são pontos para a formação de porosidade.
- O fator **Abrasivo** demonstrou baixa influência, como esperado, o uso de abrasivo novo permite obter revestimentos de boa aderência e facilita um melhor ancoramento das panquecas e com isso permitir menor porosidade.
- O fator **Temperatura** não confirmou grande influência com uma reta pequena e quase horizontal;
- O fator **Distância de Aspersão** também confirmou a teoria apresentando a maior influência, com menores porosidades em menores distâncias. Isso é possível porque, em menores distâncias, as partículas chegam ao substrato a maiores temperaturas e maior velocidade.

Os níveis de parâmetros de aspersão que minimizam a porosidade são apresentados na tabela 4-10:

Tabela 4-10: Níveis de parâmetros que minimizam a porosidade na deposição do aço inox AISI 309 L T1.

Corrente [A]	Tensão [V]	Espessura [μm]	Pressão do ar [psi]	Estado do Abrasivo	Pré aquecimento [°C]	Distância de aspersão [mm]
180	30	500	50	Novo	20	100

Implementando-se, da mesma maneira os resultados de teor de óxidos no software SADIE, obtêm-se o gráfico apresentado na figura 4-3.

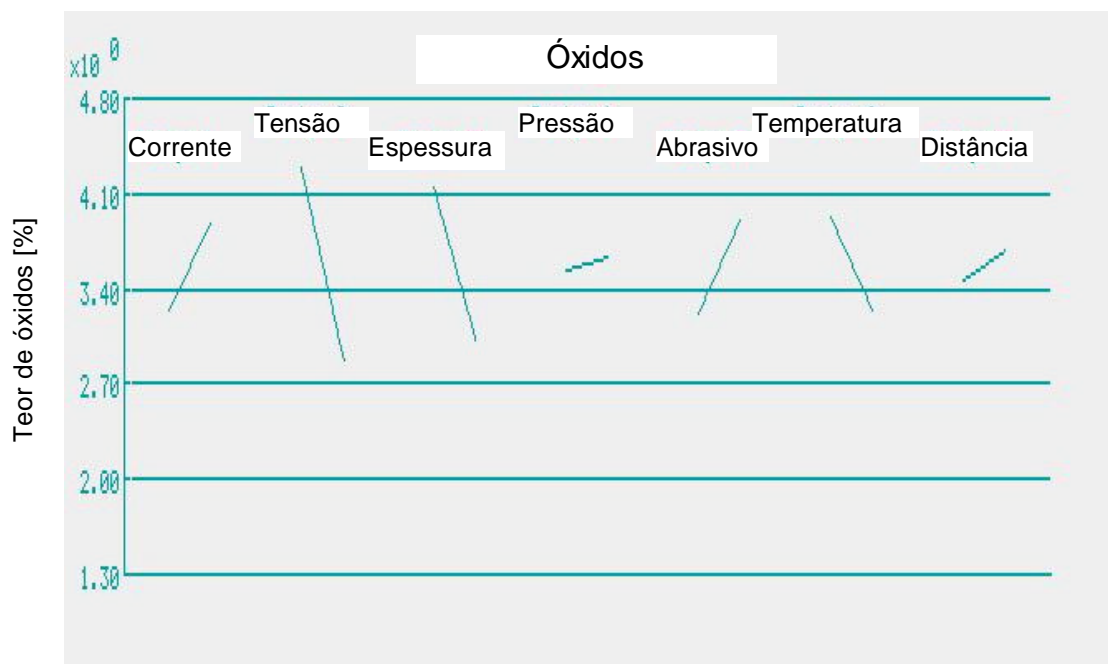


Figura 4-3: Resultado da análise do software SADIE.

Da mesma maneira, na coluna das ordenadas tem-se teor de óxidos e, para cada parâmetro, uma reta indicando sua influência. O resultado de ANOVA está na tabela 4-11.

Tabela 4-11: Resumo de ANOVA para o efeito sobre o teor de óxidos na deposição a deposição de 309L T1.

Variável	Influência [%]
Corrente	8,7
Tensão	43,1
Espessura do revestimento	27,1
Pressão do ar	0,2
Estado do abrasivo	10,1
Pré aquecimento	10,0
Distância de aspersão	0,8

Da tabela 4-11 e do gráfico 4-10, verifica-se que os fatores mais influentes são a corrente (8,7%), a tensão (43,1)%, o estado do abrasivo (10,1%) e o pré-aquecimento (10,0%).

Analisando-se cada fator isoladamente, pode-se comentar:

- O fator **Corrente** possui relativa influência (8,7%) no teor de óxidos. A menor oxidação se deve à menor corrente. Isto pode ser explicado pelo menor efeito de aquecimento que se produz no arco com a menor corrente, pelo que se transfere menor calor até o substrato, com isso será menor o tempo do substrato exposto a elevada temperatura para facilitar a oxidação.
- O fator **Tensão** possui forte influência na obtenção de menor oxidação, maior a tensão, menor a oxidação. A grande influência se deve a formação de gotas maiores. Com panquecas maiores, diminui-se a área possível de oxidar;
- O fator **Espessura** apresentou também grande influência no estudo, menor teor de óxidos com a maior espessura. Com a maior espessura e manutenção de elevada temperatura do substrato, isso faz aumentar o efeito de molhamento das panquecas, diminuindo a

fragmentação e salpicos e, com isso, fica menor a área exposta à formação de óxidos;

- O fator **Pressão**, ao contrário do esperado, mostrou pequena influência diminuição da oxidação, mas indicando melhor resultado à menor pressão;
- O fator **Abrasivo** demonstrou influência de 10%, o que pode ser dito que a rugosidade e limpeza podem ser afetadas pela qualidade da limpeza e homogeneidade da rugosidade do substrato, e isso pode ser mais bem obtido pelo uso de abrasivo novo.
- O fator **Temperatura** do substrato teve uma influência de 10%, sendo que a temperatura de pré-aquecimento utilizada de 120 °C permite manter o substrato a uma temperatura adequada para garantir boa aderência sem que isso signifique aumentar o tempo a elevada temperatura para aumentar o tempo de oxidação;
- O fator **Distância de Aspersão** também apareceu com uma pequena influência, a menor oxidação em menores distâncias. Isso é possível porque, em menores distâncias, os mecanismos 2 e 3 de oxidação tem menor tempo de atuação, ficando somente o mecanismo 4 [20], o que se encontra a uma temperatura que não apresenta facilidade para aumentar a oxidação.

Os níveis que minimizam o teor de óxidos são apresentados na tabela 4-12:

Tabela 4-12: Níveis de parâmetros que minimizam o teor de óxidos na deposição do aço inox AISI 309 L T1.

Corrente [A]	Tensão [V]	Espessura [μm]	Pressão do ar [psi]	Estado do Abrasivo	Pré aquecimento [°C]	Distância de aspersão [mm]
140	30	500	50	Novo	120	100

Ao analisar as tabelas 4-10 e 4-12 nota-se que apenas dois parâmetros divergem no resultado: corrente e pré-aquecimento. Para determinar quais seriam as condições específicas que aperfeiçoem esses parâmetros somente após a realização de ensaios de resistência à corrosão que avaliaria a proteção fornecida pelos filmes de óxido formado nas oito amostras revestidas.

Finalmente, pode-se deduzir que os revestimentos depositados com os oito experimentos permitiram obter revestimentos de baixa porosidade e ainda menor oxidação quando comparados com os resultados da literatura [21, 29] que afirmam que o processo de aspersão térmica por arco elétrico produz revestimentos de porosidade na faixa de 10-15% e oxidação superior a 10%.

4.4.3 Microestrutura Depositada com Arame 410 NiMo

Os corpos de prova preparados e fotografados no microscópio óptico podem ser observados na figura 4-4.

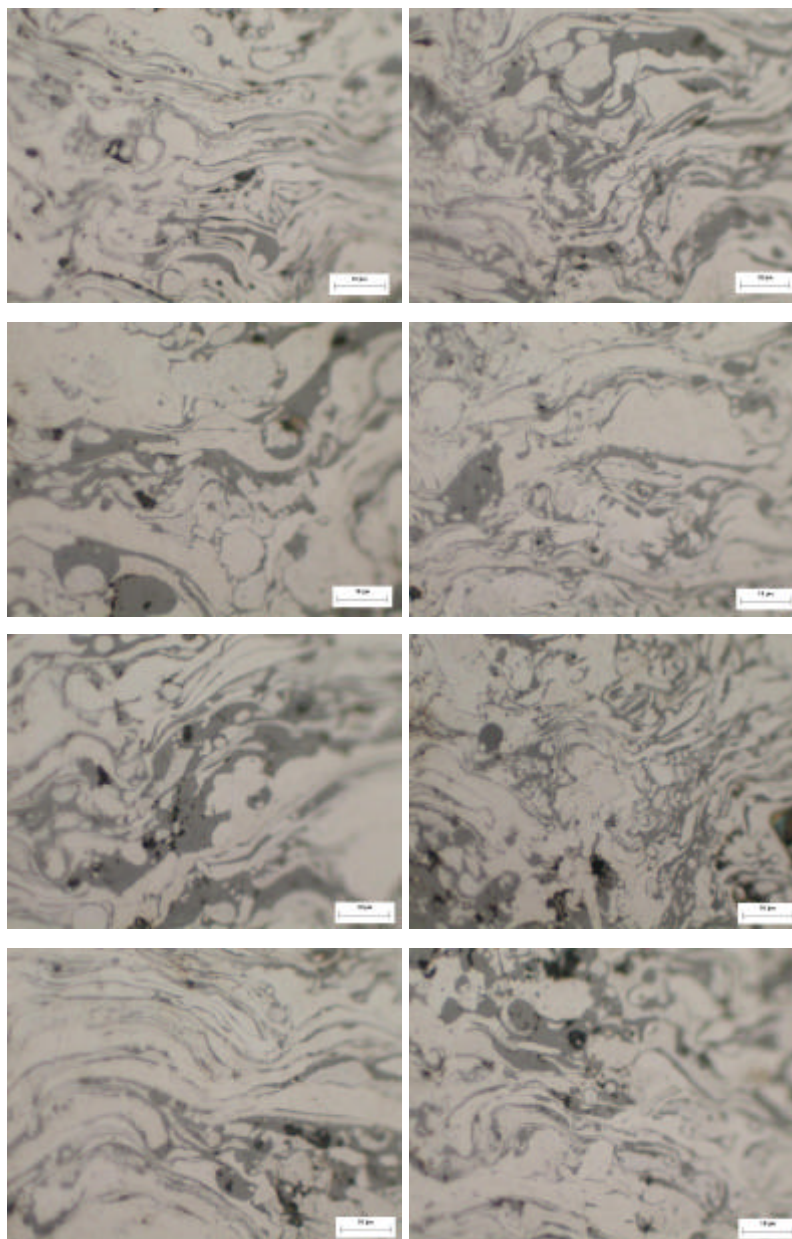


Figura 4-4: Microestrutura do revestimento de aço inoxidável AISI 410.

Na figura 4-4, também se observa a disposição típica de revestimentos aspergidos em camadas tipo panquecas. A homogeneidade da disposição mostrou-se excelente. As panquecas apresentaram-se em grande espessura. A quantidade de poros e salpicos foi reduzida.

Do mesmo modo, as regiões escuras são poros ou falhas de deposição, enquanto que as regiões cinza escuro são óxidos. As demais regiões, em cinza claro, o material depositado em boas condições.

Em geral pode-se observar que as oito microestruturas observadas mostram que os revestimentos são bastante homogêneos, com pouca oxidação, explicando a excelente aderência apresentada na medição através do ensaio de dobramento.

4.4.4 Resultado das Medições de Porosidade e Teor de Óxidos do Revestimento 410 NiMo

A análise com o software Clemex apresentou os seguintes resultados para a porosidade (tabela 4-13) e quantidade de óxidos (tabela 4-14):

Tabela 4-13: Porosidade dos revestimentos de 410 NiMo.

Amostra	1° imagem [%]	2° imagem [%]	3° imagem [%]	Média [%]
1	1,1	2,9	3	2,3
2	2,2	3,2	1,1	2,2
3	0,8	1,6	1,3	1,2
4	0,3	0,3	1,4	0,7
5	1,4	1,0	1,8	1,4
6	0,4	2,0	0,7	1,0
7	1,5	1,0	1,6	1,4
8	0,9	1,4	1,2	1,2

Tabela 4-14: Óxidos dos revestimentos de 410 NiMo.

Amostra	1° imagem [%]	2° imagem [%]	3° imagem [%]	Média [%]
1	0,9	2	1,6	1,5
2	3,1	7,6	1,8	4,2
3	1,8	5,7	3,2	3,6
4	0,6	0,4	1,3	0,8
5	3,6	1,7	5,9	3,7
6	0,7	2,9	9,9	4,5
7	1,4	0,9	4,0	2,1
8	2,0	1,7	2,0	1,9

Observando as tabelas anteriores, percebe-se a baixa porosidade apresentada no revestimento do aço AISI 410 NiMo, em média a porosidade medida foi de 1,38%, enquanto que, para o aço AISI 309L T1 foi de 2,6%.

A média do teor de óxidos, apresentado na tabela 4-14 para o aço AISI 410 NiMo, é de 2,78%, sendo menor que a média das medidas dos revestimentos de aço AISI 309L T1 (3,57%).

Implementando-se esses resultados de porosidade no software SADIE para matrizes de Taguchi com oito experimentos, sete parâmetros com dois níveis cada um, obtêm-se o gráfico de influência apresentado na figura 4-5, para o aço AISI 410 NiMo.

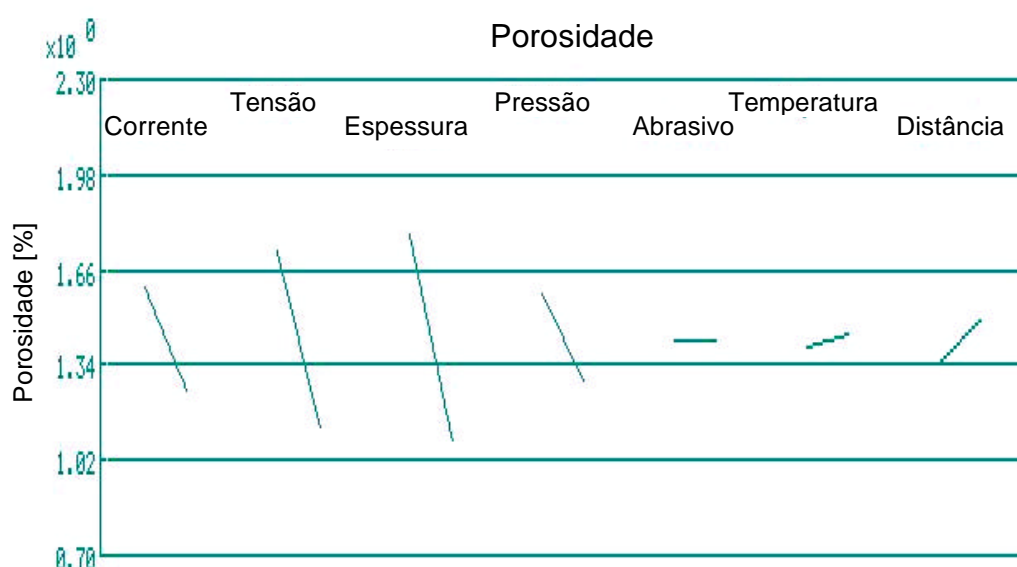


Figura 4-5: Resultado da análise do software SADIE.

Observa-se nitidamente que a tensão do arco elétrico e a espessura do revestimento são os parâmetros de maior influência na obtenção de revestimentos de menor porosidade. Sendo que juntas correspondem a quase 80% de influência, como observado na tabela 4-15, que apresenta os resultados da análise de ANOVA:

Tabela 4-15: Resumo de ANOVA para o efeito sobre a porosidade na deposição de 410 NiMo.

Variável	Influência [%]
Corrente	11,3
Tensão	33,1
Espessura do revestimento	45,1
Pressão do ar	8,3
Estado do abrasivo	0,0
Pré aquecimento	0,2
Distância de aspersão	2,07

A maior influência se deve a espessura do revestimento e a tensão. Juntas correspondem a quase 80% de influência na obtenção da menor porosidade.

Analisando-se, também, cada fator isoladamente, pode-se comentar:

- O aumento do fator **Corrente** possui influência positiva na diminuição da porosidade do revestimento, demonstrada pela inclinação da reta. A menor porosidade foi obtida em média de 1,25% de porosidade nos experimentos que utilizaram 180A e foi de 1.6% com 140A. Isto pode ser explicado pelo maior calor gerado com a maior corrente que, transfere até o substrato maior calor e com isso facilita o melhor ancoramento das panquecas.
- O fator **Tensão** possui forte influência na diminuição da porosidade, maior a tensão, menor a porosidade. Neste caso a transferência com maior tensão produz gotas maiores que, formarão camadas mais compactas com menores espaços entre camadas;
- O fator **Espessura** apresentou grande influência neste estudo, demonstrada por uma reta grande e bastante inclinada. A maior espessura apresentou menor porosidade, isto pode estar associado ao aumento do calor que a camada sofre ao ir aumentando a espessura. Isso favorece o fenômeno do molhamento e diminui os salpicos;

- O fator **Pressão** como no caso anterior mostrou influência positiva na diminuição da porosidade com o aumento da pressão. Aumentando a pressão, aumenta-se a energia cinética das partículas e, com isso, a energia de impacto da partícula com o substrato, facilitando a união das camadas;
- O fator **Abrasivo** demonstrou uma quase não influência, o uso de abrasivo velho ou novo não afetou a porosidade;
- O fator **Temperatura** não confirmou uma grande influência, com uma reta pequena e pouco inclinada. A utilização ou não de aquecimento não influenciou muito a porosidade. Como as partículas são transferidas a elevadas temperaturas e o substrato aquece entre 250 e 300°C o aquecimento do substrato mostrou-se pouco significativo;
- O fator **Distância de Aspersão** também não mostrou grande influência, mas ainda mantém relevância, com menores porosidades em menores distâncias. Com as menores distâncias perde-se menos energia térmica o que diminui a porosidade.

A minimização da porosidade é avaliada da mesma maneira anteriormente descrita. Os resultados são apresentados na tabela 4-16:

Tabela 4-16: Níveis de parâmetros que minimizam a porosidade na deposição do aço inox AISI 410 NiMo.

Corrente [A]	Tensão [V]	Espessura [μm]	Pressão do ar [psi]	Estado do Abrasivo	Pré aquecimento [°C]	Distância de aspersão [mm]
180	30	500	60	Indiferente	20	100

Igualmente, com os resultados de teor de oxidação, realizou-se nova análise com o software Sadie (figura 46), da mesma maneira, na coluna das ordenadas tem-se teor de óxidos e, para cada parâmetro, uma reta indicando sua influência. E na tabela 4-17, os resultados da análise de ANOVA:

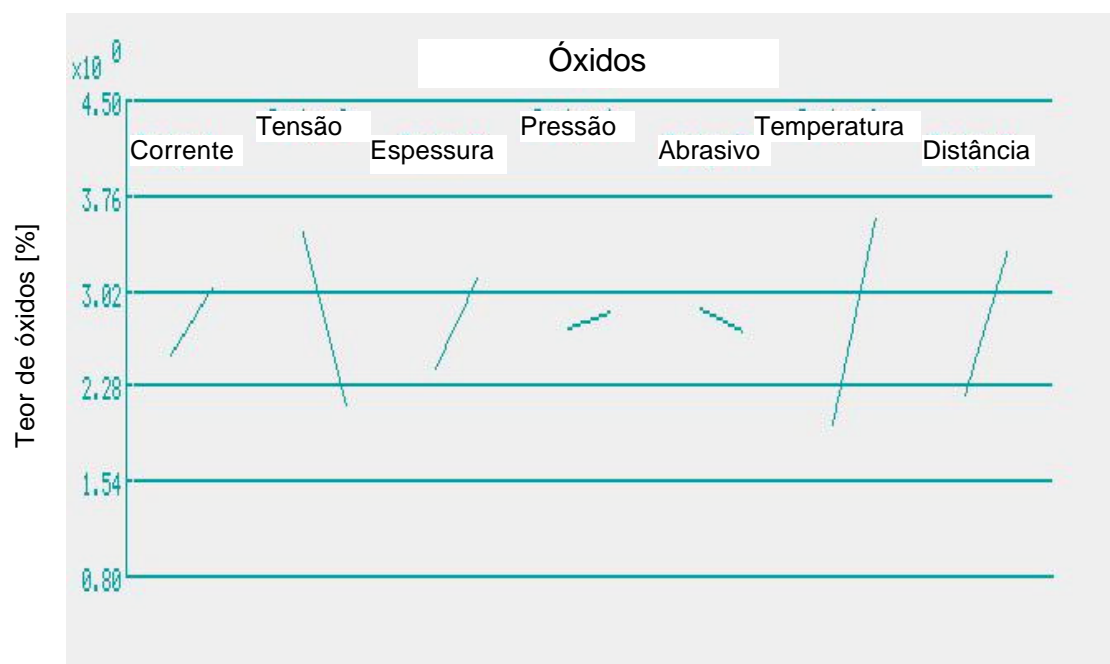


Figura 4-6: Resultado da análise do software SADIE.

Tabela 4-17: Resumo de ANOVA para o efeito sobre o teor de óxidos na deposição de 410 NiMo.

Variável	Influência [%]
Corrente	4,1
Tensão	28,5
Espessura do revestimento	7,9
Pressão do ar	0,2
Estado do abrasivo	0,5
Pré aquecimento	39,7
Distância de aspersão	19,1

As maiores influências se devem ao pré-aquecimento (39,7%), a tensão (28,5%) e a distância de aspersão (19,1%).

Analisando-se cada fator isoladamente, pode-se comentar:

- O fator **Corrente** possui relativa influência na oxidação. A menor oxidação se deve à menor corrente. Isto pode estar relacionado ao menor aquecimento que a menor corrente proporciona: com menor temperatura ocorre um menor aquecimento e, conseqüentemente, menor tempo, a elevada temperatura, para ocorrer a oxidação;
- O fator **Tensão** possui forte influência na diminuição do teor de óxidos, maior a tensão, menor a oxidação. A influência se deve a formação de gotas maiores e menores áreas expostas para ocorrer oxidação;
- O fator **Espessura** apresentou boa influência do estudo, mas, ao contrário do caso anterior, a menor oxidação ocorreu na menor espessura. Neste caso o aumento de temperatura e o maior tempo de exposição aumentam a oxidação.
- O fator **Pressão**, como no caso anterior, não apresentou influência;
- O fator **Abrasivo** não demonstrou influência, isto significa que a qualidade da limpeza e faixa de rugosidade obtida com abrasivo novo e usado não intervêm na oxidação do revestimento depositado;
- O fator **Temperatura** confirmou grande influência, indicando melhores resultados nas menores temperaturas, algo semelhante ao resultado apresentado pela espessura: manutenção da temperatura, para esse revestimento, aumenta o tempo para ocorrer oxidação;
- O fator **Distância de Aspersão** também repetiu o caso anterior, com menores oxidações em menores distâncias.

Os níveis de parâmetros que aperfeiçoam o procedimento de aspersão, segundo o teor de óxidos, são apresentados na tabela 4-18:

Tabela 4-18: Níveis de parâmetros que minimizam o teor de óxidos na deposição do aço inox AISI 410 NiMo.

Corrente [A]	Tensão [V]	Espessura [μm]	Pressão do ar [psi]	Estado do Abrasivo	Pré aquecimento [°C]	Distância de aspersão [mm]
140	30	250	50	Novo	20	100

Os parâmetros apresentados nas tabelas 4-16 e 4-18 correspondem aos dados que devem otimizar a porosidade e teor de óxidos, o que deve ser definido após a realização de ensaios de resistência à corrosão que avaliara a proteção fornecida pelos filmes de óxido formado nas oito amostras revestidas.

Finalmente, para os revestimentos produzidos com o arame AISI 410NiMo também se percebe revestimentos de baixa porosidade, 1,4 % e ainda menor oxidação, 2,8%, quando comparados com os resultados da literatura [15] que afirmam que o processo de aspersão térmica por arco elétrico produz revestimentos de porosidade na faixa de 10-15% e porosidade superior a 10%.

Deve-se comentar também que o revestimento de aço AISI 309LT1 obteve porosidade de 2,6% e oxidação de 3,6% em media para os oito experimentos, sendo que no revestimento depositado pelo aço AISI 410NiMo foram de 1,4% e 2,8% respectivamente. Isto poderia ser explicado observando as composições químicas de ambos os materiais, oferecendo o aço inoxidável AISI 309LT1 uma maior quantidade de elementos que facilitam sua oxidação, por exemplo, maior quantidade de cromo. Esta abordagem não formou parte nesta pesquisa e está sendo pesquisado num projeto maior que esta orientada para o desenvolvimento de ligas especiais para serem depositadas num ambiente oxidante como é o processo por arco elétrico.

4.5 Ensaio de Cavitação

Os corpos de prova revestidos com o aço inoxidável AISI 309LT1 foram preparados com os parâmetros que resultaram da análise dos resultados da medição da porosidade (tabela 4-7 e figura 4-2) e apresentados na tabela 4-10.

No caso dos corpos de prova revestidos com o aço 410NiMo foram preparados com os dados apresentados na tabela 4-16.

4.5.1 Revestimento de aço AISI 309L T1

Os resultados dos ensaios de erosão por cavitação para o aço inoxidável 309L T1 podem ser vistos na figura 4-7.

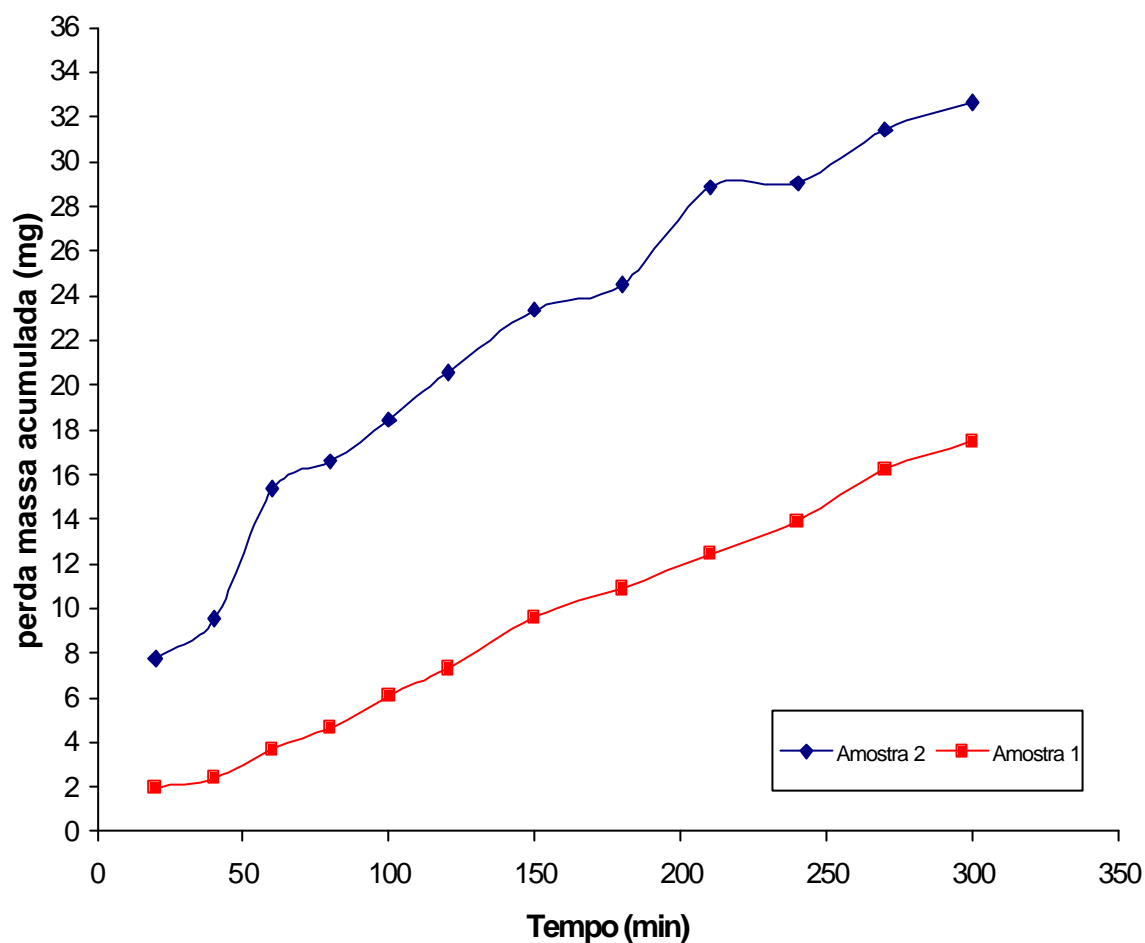


Figura 4-7: Resultado do ensaio erosivo de cavitação para o aço inoxidável 309L T1.

Observa-se na figura que apenas aos 50 min ocorre a incubação da erosão por cavitação, mostrando a amostra 1 um menor aumento da taxa de perda de massa.

4.5.2 Revestimento de aço AISI 410 NiMo

Os resultados dos ensaios de erosão por cavitação para o aço inoxidável 410 NiMo podem ser vistos na figura 4-8.

Percebe-se a proximidade das curvas entre as duas amostras.

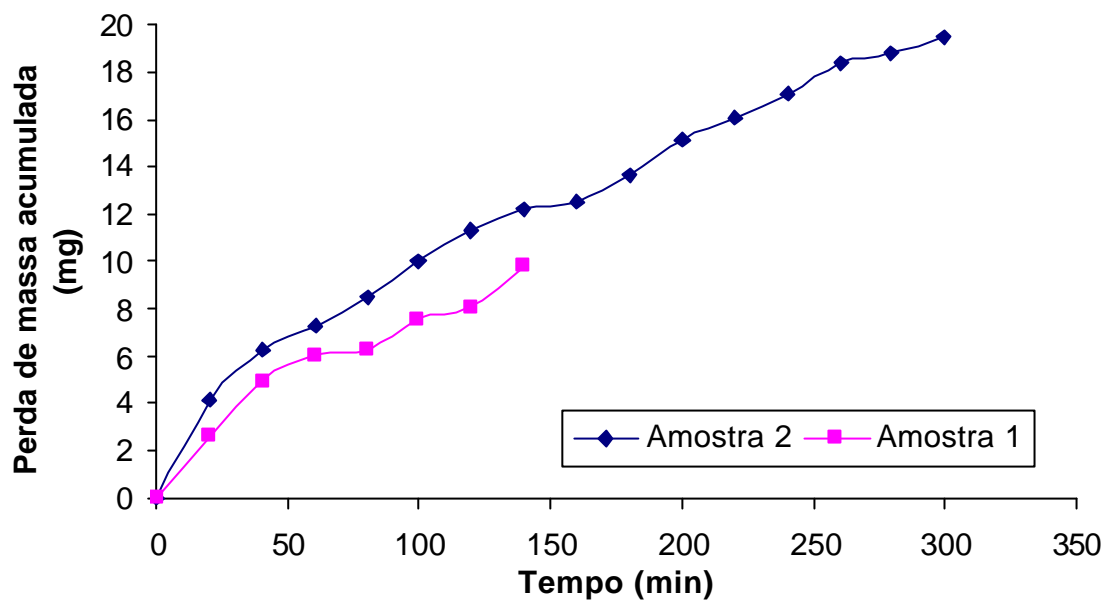


Figura 4-8: Resultado do ensaio erosivo de cavitação para o aço inoxidável 410 NiMo.

Observa-se que no aço AISI 410NiMo o período de incubação também ocorre até os 50 min, sendo que a taxa de perda de massa acumulada é menor que a ocorrida para o aço inoxidável AISI 309LT1. Destacando que o comportamento das duas amostras é mais homogêneo.

4.5.3 Comparação da Resistência à Cavitação das Ligas 309L T1, 410 NiMo com a Liga Cavitec®

Na figura 4-9 observamos o comportamento das três ligas durante o ensaio acelerado de cavitação.

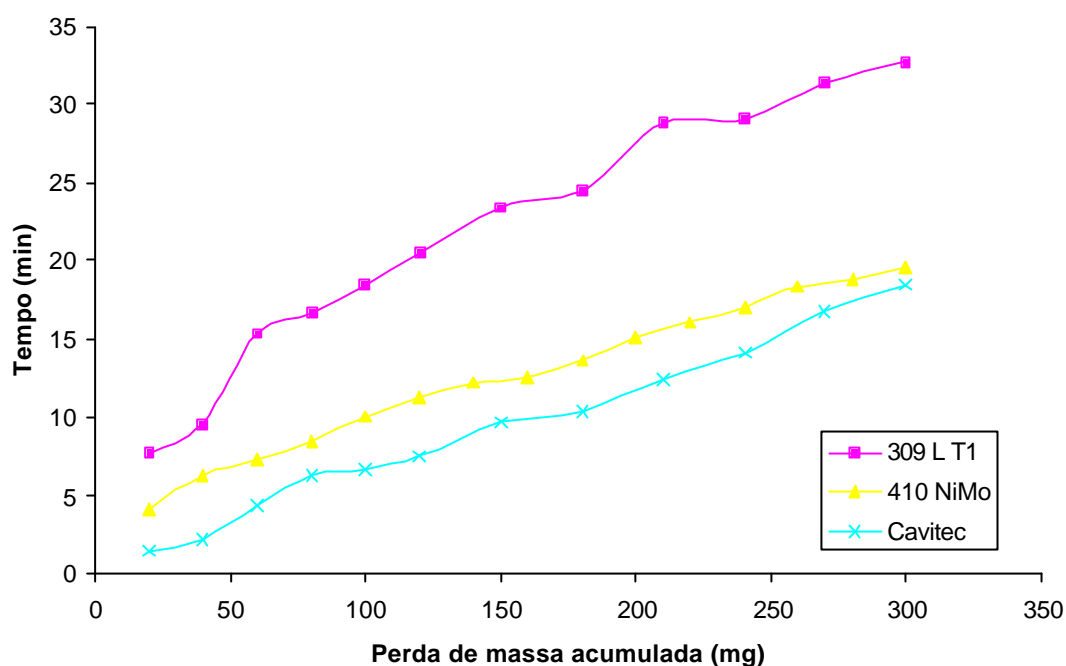


Figura 4-9: Resultado do ensaio erosivo de cavitação para as três ligas em estudo.

Na tabela 4-19 pode-se observar as taxas de erosão (mg/h) para os três materiais ensaiados.

Tabela 4-19: Taxas de erosão no ensaio de cavitação.

Material e Processo	Taxa de Erosão (mg/h)
309L ASP	4,95
410 ASP	3,90
Cavitec®	3,65

Observando a figura 4-9 e a tabela 4-19 pode-se comentar primeiramente que os revestimentos dos aços inoxidáveis AISI 309LT1 e 410NiMo submetidos ao ensaio acelerado de cavitação foram resistentes e não foram destacados do substrato. Isto permite também validar o ensaio de dobramento como teste de qualificação da aderência dos revestimentos nos substratos utilizados.

Com relação à resistência à cavitação dos revestimentos depositados, observa-se que o revestimento do aço 410NiMo tem taxa de erosão muito próxima à obtida pela liga Cavitec. Liga especialmente desenvolvida para resistir à cavitação. Com relação aos revestimentos de aço inoxidável 309LT1 a maior taxa de erosão poderia estar relacionado à maior porosidade e também maior quantidade de óxidos no revestimento.

4.6 Avaliação da morfologia da região erodida no ensaio de cavitação.

Da análise em microscopia eletrônica de varredura, chegaram-se as seguintes avaliações:

4.6.1 Revestimento de AISI 309L T1

Ao observar a figura 4-10a, observam-se regiões erodidas pela cavitação e panquecas que não foram afetadas. A aderência das camadas resiste às implosões da cavitação apresentando um mecanismo de erosão similar ao de superfícies totalmente sólidas, como o caso de revestimentos de soldagem.

A figura 4-10b permite observar que as panquecas foram cortadas transversalmente e não arrancadas, verifica-se também que algumas panquecas resistem à erosão, como exemplo a panqueca destacada na figura 4-10c. Isso demonstra uma tendência de coesão alta entre as camadas.

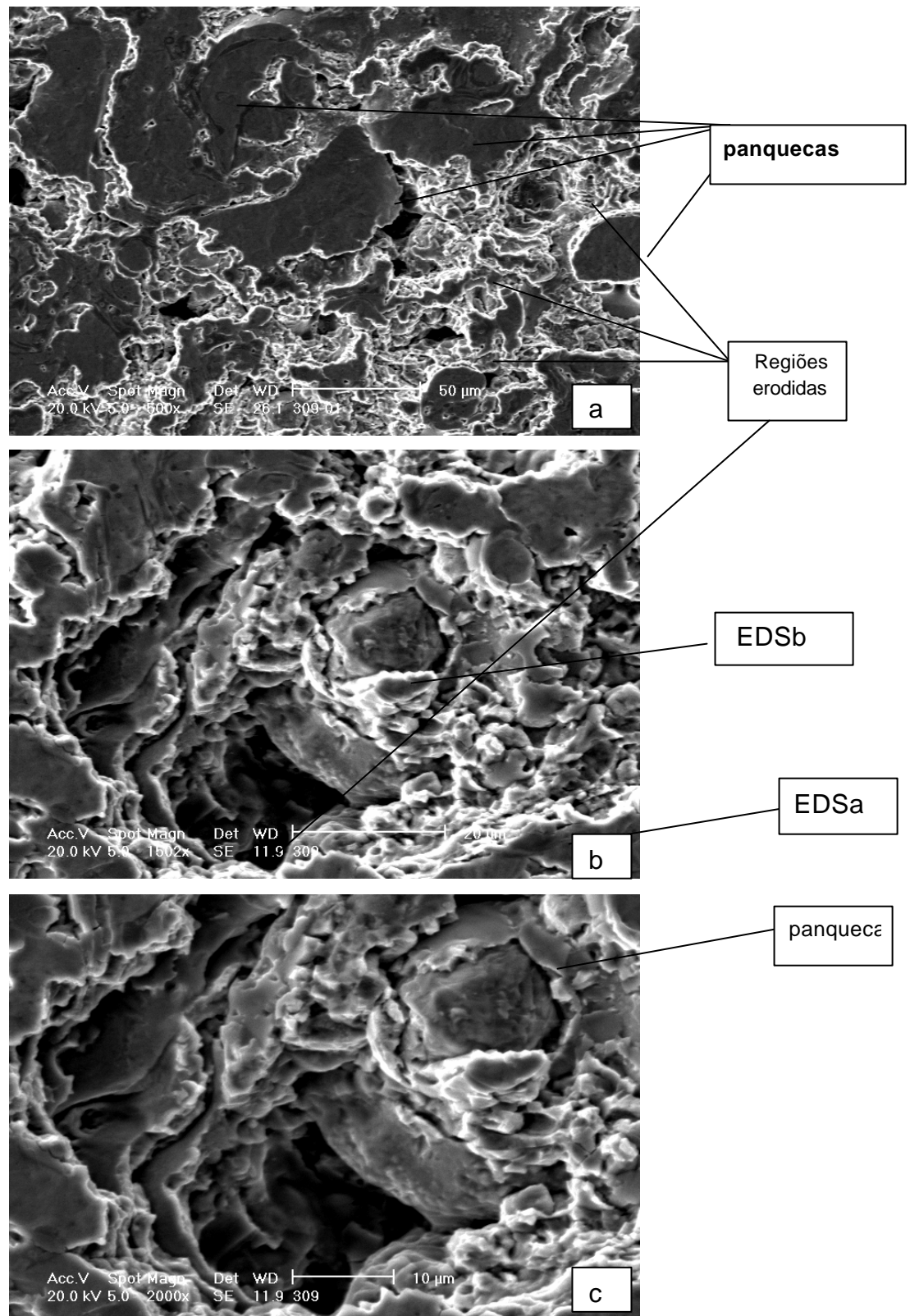


Figura 4-10: Micrografia de uma região erodida no ensaio de cavitação acelerada

Da análise de constituintes por EDS, pode-se comentar que, na região EDSa (superfície), existe uma grande concentração de oxigênio registrando 10,6% em peso (tabela 4-20), sendo que na área do EDSb (região afetada pela erosão) a quantidade é de somente 2% (tabela 4-21). Isto poderia representar que na superfície a quantidade de óxido é maior e no interior da camada é bem menor, facilitando com isso a nucleação da erosão rapidamente na superfície do revestimento. E, quando a erosão continua, as panquecas oferecem maior resistência a serem erodidas.

Este fato poderia explicar o superior desempenho do revestimento do aço 410NiMo que tem menor porcentagem de oxidação e que apresenta também menor taxa de perda de massa.

Tabela 4-20: Dados dos principais constituintes obtidos pelo EDSa.

Elemento	Peso [%]
OK	10,692
CrK	24,374
FeK	53,495
NiK	10,484
Total	100

Tabela 4-21: Dados dos principais constituintes obtidos pelo EDSb.

Elemento	Peso [%]
OK	1,95
CrK	23,083
FeK	68,076
NiK	6,892
Total	100

Dessa análise, acredita-se que o revestimento de aço inoxidável AISI 309LT1 sofreu cavitação iniciando-se nas panquecas com maior oxidação.

4.6.2 Revestimento de AISI 410 NiMo

Observando-se a figura 4-11 pode-se comentar que houveram regiões erodidas pela cavitação e panquecas que não foram afetadas (4-11a). Da mesma forma que o caso anterior, as panquecas resistem à erosão, não sendo destacadas e sim, erodidas como nas superfícies soldadas (4-11b). Houve muitas panquecas que resistiram à erosão e outras que foram deformadas, arrancando partes das mesmas (4-11c).

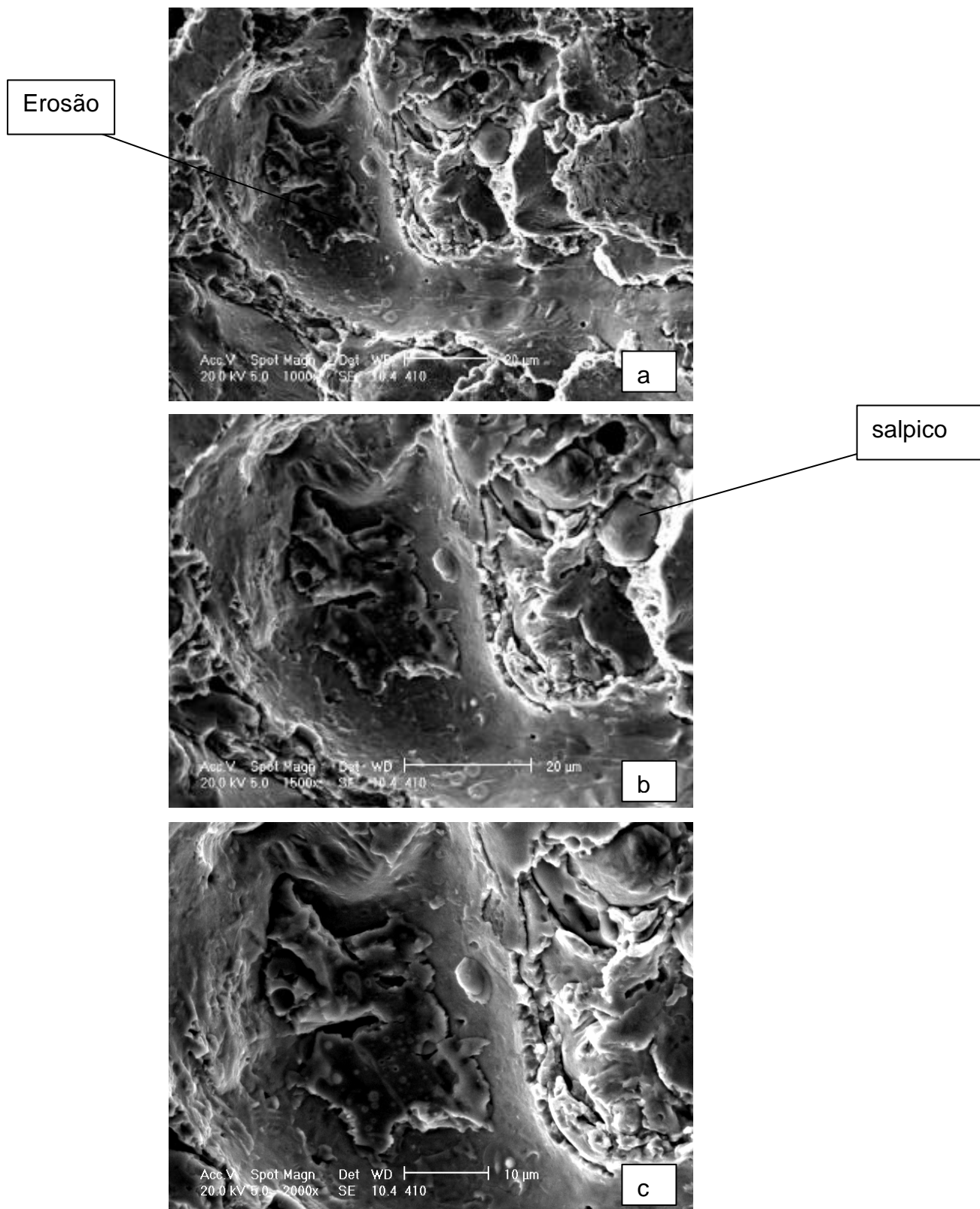


Figura 4-11: Micrografias da região erodida no ensaio de cavitação acelerada.

Ao observar os resultados da análise EDS, pode-se comentar que na região EDSa (na superfície) não há uma grande concentração de oxigênio como no caso anterior, a avaliação quantitativa desse ponto, registrada na tabela 4-22, apresenta 4,46% em peso, sendo que no EDSb (região cavitada) a quantidade é pouco menor, 4,3% (tabela 4-23). Isto representa que não houve uma grande diferença de teor de óxidos entre o interior e a superfície. Como os valores de oxidação são inferiores ao do aço AISI 309LT1, pode-se inferir um dos motivos dos melhores resultados de resistência à cavitação apresentados pelo aço AISI 410 NiMo.

Tabela 4-22: Dados dos principais constituintes medidos onde foi registrados os EDSa.

Elemento	Peso %
OK	4,463
SiK	0,676
CrK	12,35
FeK	78,944
NiK	3,567
Total	100

Tabela 4-23: Dados dos principais constituintes medidos onde foi registrados os EDSb.

Elemento	Peso %
OK	4,292
SiK	0,845
CrK	14,087
FeK	77,539
NiK	3,241
Total	100

Pode-se acreditar que a maior homogeneidade do teor de óxidos na superfície e interior das camadas apresentado pelo aço AISI 410 NiMo, foi um dos motivos dos melhores resultados de resistência à cavitação deste aço.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Os resultados obtidos indicam que as ligas AISI 309LT1 e AISI 410NiMo são viáveis de depositar através do processo de aspersão térmica por arco elétrico na recuperação de regiões cavitadas, por apresentarem baixa porosidade e baixo teor de óxidos além de não sofrerem desgarramento do revestimento durante o ensaio de cavitação.
- Os revestimentos dos aços AISI 309LT1 e 410NiMo depositados pelo processo por arco elétrico apresentaram resistência à erosão por cavitação equivalente à liga Cavitec depositada pelo mesmo processo.
- A limpeza e faixa de rugosidade obtidas com abrasivo novo e usado foram suficientes para manter boas as características de aderência do revestimento.
- O ensaio de dobramento foi eficaz para qualificar os revestimentos depositados.
- Dos revestimentos durante a deposição pelo processo a arco elétrico, o de aço inoxidável 309LT1 mostrou-se mais estável que o 410NiMo durante a deposição, o qual apresentou maior quantidade de respingos e falhas no arco;
- Os depósitos de aço 410NiMo apresentaram as menores percentagens de porosidade e oxidação nas condições estudadas.

Das conclusões anteriores, pode-se recomendar pesquisas futuras nas seguintes linhas:

- Desenvolvimento de uma liga própria para ser depositada por aspersion térmica que apresente maior resisténcia à cavitação que as ligas estudadas;
- Avaliar a relação de custos entre efetuar-se a recuperação das áreas cavitadas das turbinas por soldagem e por aspersion térmica, incluindo nisso, os períodos de indisponibilidade e entre novas intervenções;
- Utilizar outras técnicas de aspersion térmica, além do arco elétrico, associado à processos automatizados de revestimento.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PROCOPIAK, L.A.J.; ***Resistência à cavitação de três revestimentos soldados***; Dissertação de Mestrado. Florianópolis. 1997.
- [2] HENKE, S.L. et al.; ***Especificação de procedimentos de soldagem de aços inoxidáveis martensítico macios sem tratamento térmico posterior***. XV Congresso Latino-americano e V Ibero-Americano de Soldagem. Fortaleza. 1998.
- [3] HENKE, S.L. ***Desenvolvimento de procedimento de soldagem do aço inoxidável martensítico macio tipo CA6Mn sem tratamento térmico posterior***. Dissertação de Mestrado. Florianópolis. 1998.
- [4] BARRA, S.R. ***Influência dos procedimentos de soldagem sobre a resistência à cavitação de depósitos obtidos com a utilização de arames tubulares de aços inoxidáveis ligados ao cobalto***. Dissertação de Mestrado. Florianópolis. 1998.
- [5] BRASIL, F. ***Resistência à corrosão sob tensão em tubos de aço inoxidável AISI 304L revestidos com alumínio depositados por aspersão térmica***. Dissertação de Mestrado. Curitiba. 2003.
- [6] HAMMITT, F.G. & HEYMANN, F.J. ***Liquid-Erosion Failure***, ASTM
- [7] THIRUVENGADAM, A.; WARING, S. ***Mechanical Properties of Metals ant their Cavitation Damage Resistance***. Hydronautics, jun. 64, pag 233-235.
- [8] RAO, S.; KANDASAMI, P.: ***Cavitation Damage and Materials Properties***. JE(I) Journal. Mar. 1972.

[9] RICHMAN, R.; McNAUGHTON, W.: ***Correlation of Cavitation Erosion Behavior with Mechanical Properties of Metals***. Wear, 140. 1990.

[10] SOARES, G.; SOUZA, N.; DALLEONE, E.; BUARQUE, J.S.; AMADO, L.A.S.: ***Avaliação da Eficácia do Shot Peening e de Revestimentos Não Soldados Contra a Erosão por Cavitação em Turbinas Hidráulicas***. VIII EBRATS. São Paulo. 1994.

[11] PROCOPIAK, L. A. J.; SINATORA, A.; BURCHINELLI, A.: ***Comportamento a Erosão por Cavitação de Três Revestimentos Soldados de Aço Inoxidáveis***. Anais do III Seminário Brasileiro de Materiais Resistentes ao Desgaste. Fortaleza. 1994.

[12] IBACK, A.: ***Verschleissverhalten von Nichtrostenden Ferritisch-austenitischen Duplex-Stählen – Abrasion und Erosion***. Tese de Doutorado. Alemanha. 1994.

[13] SCHUMANN, H.: ***One Hundred Years of Research on Martensite***. Pract. Met., 26. 1989.

[14] LEVY, A.; CROOK, P.: ***The Erosion Properties of Alloys for the Chemical Processing Industries***. Wear, 151. 1991.

[15] LIMA, C. C.; TREVISAN, R. ***Aspersão térmica – fundamentos e aplicações***. São Paulo: Artliber Editora, 1ed. 2001.148p.

[16] PAREDES, R. S. C. ***Estudo de revestimentos de alumínio depositados por três processos de aspersão térmica para a proteção do aço contra a corrosão marinha***. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1998. 245p.

[17] PAWLOWSKI, P. ***The Science and Engineerig of Thermal Spray Coatings***. France, Editora John Wiley & Sons 1995.

[18] AWS COMMITTEE ON THERMAL SPRAYING. ***Thermal Spraying Practice, Theory, and Application***. American Welding Society, INC. Miami 1985.

[19] AMIN, M. ***Effects of process parameters on surface roughness and porosity for coatings deposited using the arc spray process***. The Welding Institute. 32p. 1991.

[20] RODRIGUEZ, R.; SILVA, J.; LIMA, D. ***Formação de óxido de alumínio na aspersão térmica***. XV Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal. 2002.

[21] CAPRA, A.C.; PUKASIEWICZ, A.; WILL, C.; CHANDELIER, J.: ***Relatório Técnico Da Etapa De Caracterização De Revestimentos E Avaliação De Desempenho Das Ligas Em Desenvolvimento Do Projeto Novos Materiais E Processos***. Relatório Técnico Projeto Tratasuper. Curitiba. 2005.

[22] ASTM A 743-93. ***Standart Specification for castings, iron-chromium, iron-chromium-nickel, corrosion resistant, for general application***. 1993.

[23] VIVACQUA, C. A. ***Uma apresentação e crítica aos métodos de Taguchi em planejamento de experimentos***. Dissertação de Mestrado. Campinas. 1995.

[24] LOPES, A. C.: ***Avaliação da Soldabilidade dos Aços Inoxidáveis Ferríticos Extra Baixo Intersticiais EBI/P444***. Dissertação de Mestrado. Curitiba. 2005.

[25] MILITARY STANDARD 2138-A. ***Metal sprayed Coatings for Corrosion Protection Aboard Naval Ships (METRIC)*** 1992. 36p.

[26] CONTEC - Comissão de Normas Técnicas – Petrobrás. ***N- 2568. Seleção e Aplicação (por aspersão térmica) do Alumínio, Zinco e suas ligas.*** 34p. Jan 1995.

[27] PAREDES, R.; AMICO, S.; d'OLIVEIRA, A. ***The effect of roughness and pré-heating of the substrate on the morphology of aluminium coatings deposited by thermal sprayng.*** Surface&Coatings Technology 200. ED, ELSEVIER pg. 3049-3055, 2006.

[28] NEWBERY, A.,P., GRANT, P.,S., NEISER, R.A., ***The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying,*** Surface & Coating Technology, n. 195: p. 91-101. 2005.

[29] I'ANSON, K, et al. ***Use of the Shot peening Process for surface Modification of Thermal Sprayed Coatings.*** Proceedings of the Fourth National Thermal Spray Conference, p. 139-145, Pittsburgs, PA. May 1997.

[30] XIAOJUN, Z. ***Effect of surface modification processes on cavitation erosion resistance.*** Tese de Doutorado. Curitiba. 2002.

[31] KUMAR, A.; BOY, J.H. ***Cavitation resistance of thermal spray coatings.*** Tennessee Valley Authority. S/D.

[32] BALL, J.W.; TULLIS, J.P. & STRIPLING, T. ***Predicting Cavitation in Sudden Enlargements.*** Journal of the Hydraulic Division, paper no. 11442, pp.857-870, 1975.

ANEXOS

Tabela A-1: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 309L T1.

Amostra	Sentido	Ra	Ry	Rz	RSm
1	a	7,69	71,78	41,78	107
	b	6,81	44,75	44,35	179
	c	6,63	38,34	38,44	136
2	a	5,65	33,70	33,70	102
	b	6,63	38,68	38,68	110
	c	8,10	51,72	51,72	165
3	a	8,47	49,65	49,65	105
	b	5,94	36,82	36,82	91
	c	9,29	48,72	48,72	79
4	a	8,40	51,02	51,02	97
	b	6,63	38,36	38,36	127
	c	7,28	46,27	46,27	68
5	a	9,34	45,32	45,32	102
	b	8,57	49,11	49,11	152
	c	7,87	51,82	51,82	88
6	a	6,83	36,81	36,81	99
	b	9,62	47,28	47,28	130
	c	6,07	36,89	36,89	78
7	a	7,67	40,26	40,26	127
	b	6,48	41,86	41,86	115
	c	8,39	47,41	47,41	192
8	a	10,42	53,26	53,26	324
	b	7,64	39,06	39,06	187
	c	7,28	41,40	41,40	106

Tabela A-2: Rugosidade do substrato jateado para revestimento com 410 NiMo.

Amostra	Sentido	Ra	Ry	Rz	RSm
1	a	5,04	30,58	30,58	100
	b	5,38	33,97	33,97	91
	c	5,44	33,18	33,18	101
2	a	5,88	36,28	36,28	108
	b	5,28	29,98	29,98	105
	c	5,13	29,91	29,91	104
3	a	5,25	28,41	28,41	94
	b	5,18	31,02	31,02	97
	c	4,96	28,58	28,58	86
4	a	4,84	26,56	26,56	98
	b	4,91	32,00	32,00	87
	c	5,23	29,26	29,26	92
5	a	5,59	33,41	33,41	104
	b	5,31	31,49	31,49	82
	c	4,75	30,02	30,02	92
6	a	5,17	30,82	30,82	82
	b	5,28	32,57	32,57	86
	c	5,41	31,98	31,98	77
7	a	4,48	25,64	25,64	74
	b	5,16	29,49	29,49	90
	c	5,61	33,98	33,98	127
8	a	5,13	34,73	34,73	80
	b	4,68	30,16	30,16	77
	c	5,04	29,08	29,08	87

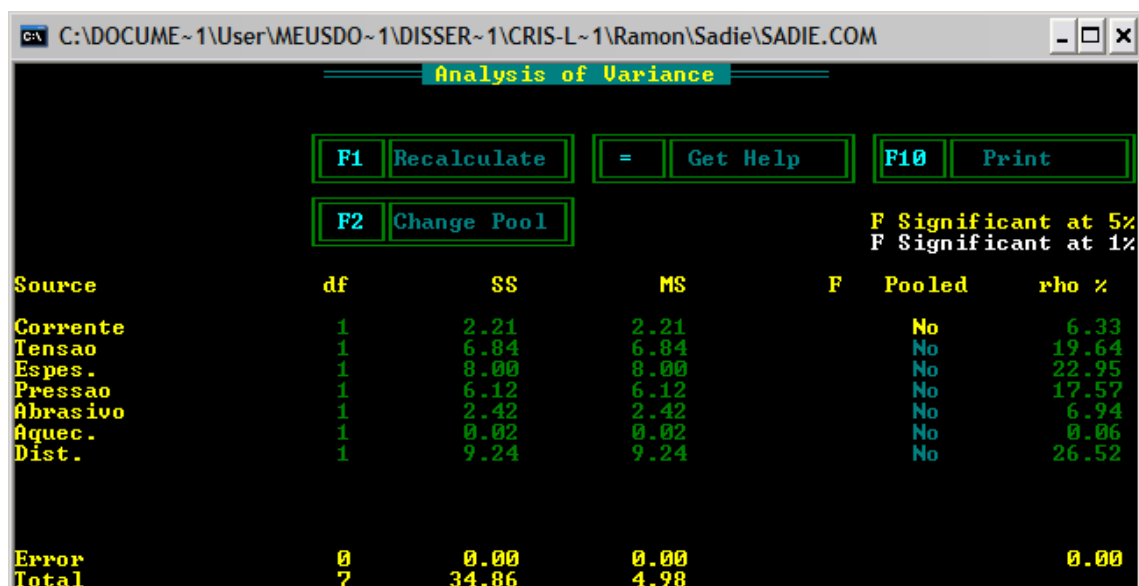


Figura A-1: Análise de anova para porosidade da amostra depositada com 309L

T1

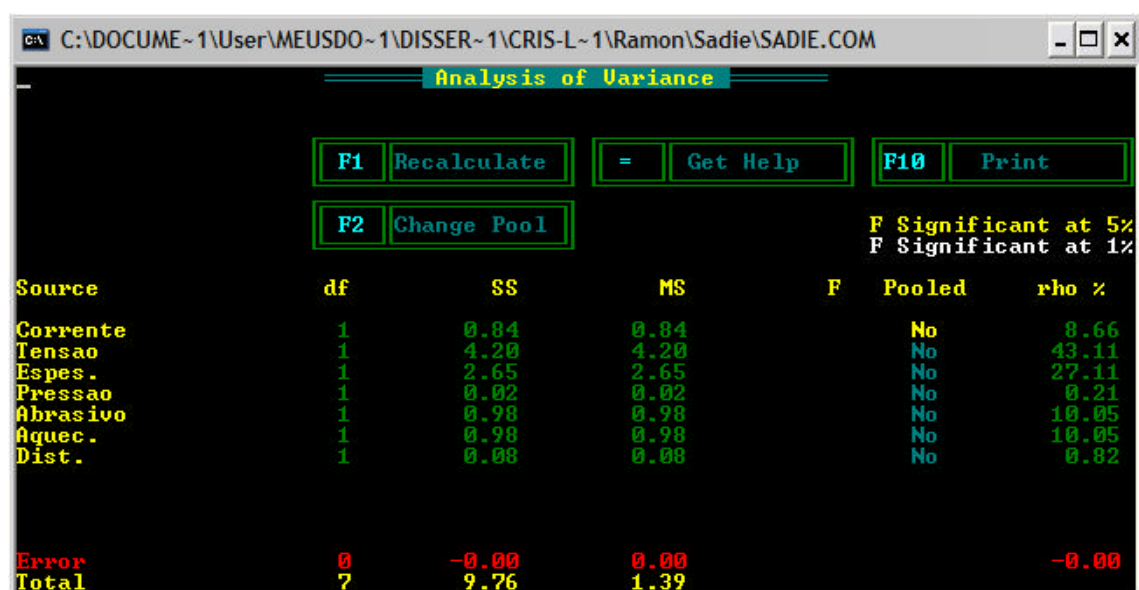


Figura A-2: Análise de anova para o teor de óxidos da amostra de 309L T1

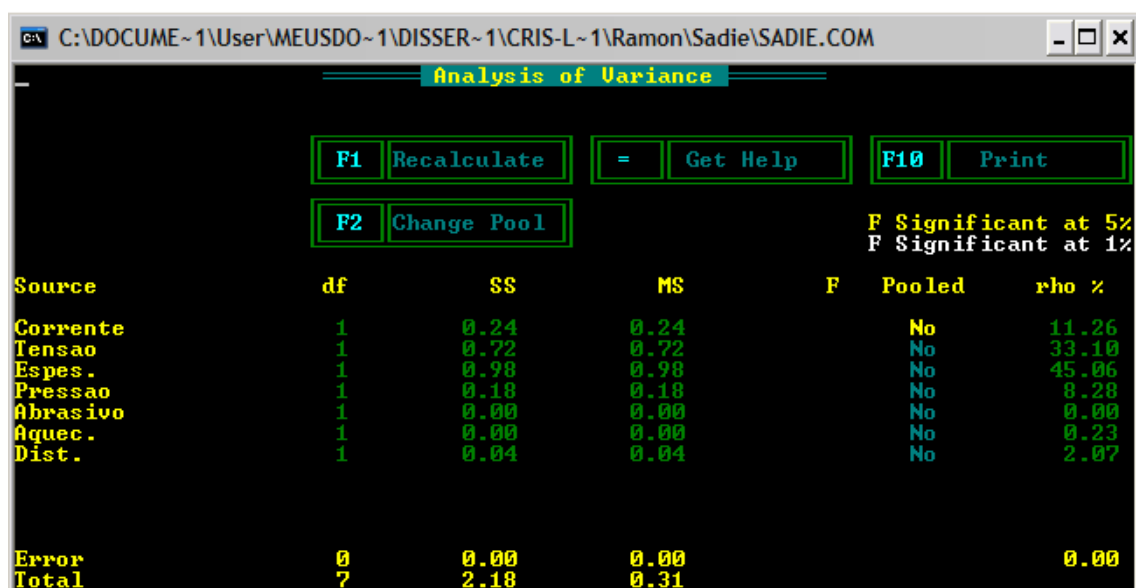


Figura A-3: Análise de anova para a porosidade da amostra depositada com 410 NiMo

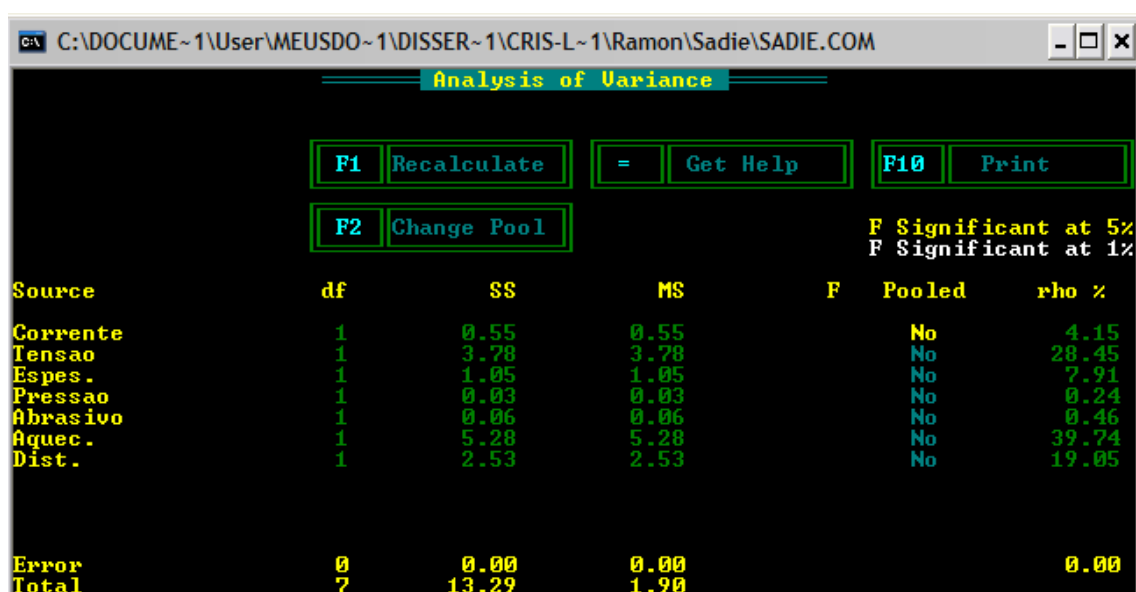


Figura A-4: Análise de anova para o teor de óxidos da amostra de 410 NiMo